



Universidade Federal do Paraná (UFPR)
Setor de Geociências
**Programa de Pós-Graduação em
Geologia**



Antônio Alessandro de Jesus Braga

**“INFLUÊNCIA ESTRUTURAL SOBRE CAVERNAS EM FORMAÇÕES
FERRÍFERAS, CARAJÁS-PA.”**

Nível: **Mestrado**

Área de Concentração: **Geologia Ambiental**

Linha de Pesquisa: **Análise Multitemporal, Neotectônica e Riscos Geológicos**

Orientador: **Dr. Alberto Pio Fiori**

Coorientador: **Msc. Francisco Ribeiro da Costa**

Curitiba

Maio/2016



Universidade Federal do Paraná (UFPR)
Setor de Geociências
**Programa de Pós-Graduação em
Geologia**



Antônio Alessandro de Jesus Braga

**“AVALIAÇÃO ESTRUTURAL E INFLUÊNCIA NEOTECTÔNICA SOBRE
CAVERNAS EM FORMAÇÕES FERRÍFERAS, CARAJÁS-PA.”**

Dissertação apresentada ao
Programa de Pós-Graduação em
Geologia, Universidade Federal do
Paraná (UFPR) para obtenção do
título de mestre em Geologia.

Curitiba
Maio/2016

TERMO DE APROVAÇÃO

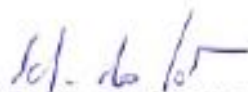
ANTÔNIO ALESSANDRO DE JESUS BRAGA

*“Influência estrutural sobre cavernas em
formações ferríferas, Carajás - PA.”*

Dissertação de Mestrado aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre no Programa de Pós-Graduação em Geologia, área de concentração em Geologia Ambiental, da Universidade Federal do Paraná. Comissão formada por:



Profª. Drª. Ana Valéria dos Reis Pinheiro - UNIFESSPA



Prof. Dr. Eduardo Salamuni - UFPR



Prof. Dr. Alberto Pio Fiori - UFPR
Presidente

Curitiba, 28 de março de 2016.

Braga, Antônio Alessandro de Jesus
"Influência estrutural sobre cavernas em formações ferríferas,
Carajás-PA" / Antônio Alessandro de Jesus Braga : – Curitiba, 2016.
66 f. : il.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Setor
de Ciências da Terra, Programa de Pós-Graduação em Geologia.
Orientador: Alberto Pio Fiori
Coorientador: Francisco Ribeiro da Costa
Bibliografia: p. 59-61

1. Grutas. 2. Esterogramas. I. Fiori, Alberto Pio. II. Costa,
Francisco Ribeiro da. III. Título.

CDD 551.447

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus, pois ele é o responsável por tudo que acontece em minha vida, sem ele, nada disso seria possível.

Agradeço aos meus heróis, meu pai, João Pereira Braga e minha mãe, Maria Arlete de Jesus Braga. Sem esquecer-se dos meus irmãos, Alex e Alessandra.

Agradecimento especial a minha amiga e namorada Erica Cabral. A qual sempre me apoiou em minhas decisões. Teve participação muito importante no trabalho, com algumas e discussões e até mesmo na confecção da dissertação.

Ao meu orientador e coorientador, Alberto Pio Fiori e Francisco Ribeiro da Costa, respectivamente.

À empresa BRANDT MEIO AMBIENTE pela disponibilização de muitos dados apresentados neste trabalho. Principalmente à equipe de campo, Adimir, Chrystopher, Antônio, Márcio e Gilberto, além do Allan Douglas. Pois a maioria dos dados foi coletada e tratado com o ajuda dessas pessoas.

À empresa VALE/SA através do projeto PROCAV, o qual me forneceu bolsa de estudos durante o mestrado. Principalmente aos coordenadores Geólogos, Daniele Gonçalves e Antônio Emídio.

Agradeço também ao Programa de Pós Graduação em Geologia da UFPR por toda contribuição para elaboração desta dissertação.

RESUMO

A pesquisa foi realizada no contexto geológico da Bacia Carajás, Província Mineral de Carajás no sudeste do Pará. O objetivo é estudar cavernas hospedadas em Formações Ferríferas Bandadas (FFB) que geologicamente estão inseridas na Formação Carajás, bem como, em Canga. Poucas pesquisas foram realizadas no sentido de avaliar a influência estrutural sobre cavernas nessa litologia. Desta forma, foram realizadas análises buscando entender de que forma estruturas descontínuas, fraturas e bandamentos, influenciam no desenvolvimento dessas feições “pseudocársticas”. Inicialmente foi gerado a rede de drenagem com objetivo de individualizar os canais de acordo com seu nível de hierarquia para análise tectônica. Em campo foram coletadas medidas estruturais de fraturas e bandamentos para confecção de estereogramas. Muito embora algumas cavernas pareçam não seguir nenhum padrão estrutural a grande maioria apresenta influencia nesse sentido. Estruturas descontínuas facilitam a percolação de fluidos, ocasionando a completa dissolução e/ou alteração de minerais menos resistentes, a se destacar as bandas formadas basicamente por sílica. Assim, uma caverna poderia se desenvolver de forma pronunciada segundo a direção de uma determinada estrutura. Por sua vez, aquelas que não seguem padrão algum, podem estar relacionadas à porosidade primária da rocha por onde o fluido poderia percolar gerando o mesmo efeito, ou ainda, serem geradas a partir de acomodação de blocos. Portanto, com base na comparação de estereogramas de bandamento e fraturas com a direção dos principais condutos, foi possível estabelecer que as cavernas se desenvolvam segundo a direção dessas estruturas. Ou seja, a maioria das cavernas de Carajás está relacionada a um padrão estrutural, conclusão que pode se estender a outros litotipos como calcário e arenito. As estruturas consideradas mais recentes (Cenozoico) da região proveniente de movimentação tardia, em acordo com a literatura teriam direções E-W, para as reativadas, e N-S para aquelas neoformadas. No entanto, com base nos diagramas de rosetas gerados a partir dos canais de drenagem de primeira ordem em comparação com as principais direções de condutos das cavernas, não foi possível estabelecer relação com eventos tectônicos recentes, carecendo ainda de mais estudos neste âmbito.

ABSTRACT

The survey was conducted in the geological context of the Carajás Basin, Carajás Mineral Province in the southeast of Pará. The aim is to study caves hosted in banded iron formations (BIF) that geologically are inserted in the Carajás formation as well as in Canga. Little research has been conducted to assess the structural influence on caves in this lithology. Thus, analyzes were performed in order to understand how discrete structures, fractures and banding, influence the development of these features "pseudokarstic". Initially it was generated drainage network in order to individualize the channels according to their hierarchy level for tectonic analysis. Field were taken structural measures fractures and banding for making stereograms. Although some caves do not seem to follow any structural pattern most present influence in this direction. discontinuous structures facilitate the percolation of fluids, causing complete dissolution and / or alteration of less resistant minerals, to highlight the bands basically formed by silica. Thus, a cave could develop pronounced according to the direction of a given structure. In turn, those not following a standard, can be related to the primary rock porosity through which fluid may percolate causing the same effect, or even be generated from accommodation blocks. Therefore, based on comparison stereograms banding and fractures in the direction of the main conduit, it was possible to establish that the caverns are developed in the orientation of these structures. That is, most of the caves of Carajás is related to a structural pattern, the conclusion that can be extended to other rock types such as limestone and sandstone. The more recent structures considered (Cenozoico) from the delayed drive region in accordance with the literature would E-W direction for the re-enabled, and N-S for those newly formed. However, based on rosettes diagrams generated from the first order drainage channels compared to the main directions of conduits of caves, it was not possible to establish relation to recent tectonic events, still lacking in most studies in this area.

LISTA DE FIGURAS

CAPITULO I

Figura 1: Fluxograma de atividades.	12
Figura 2: Mapa de Localização da área de trabalho em Serra Norte com relação aos municípios de Marabá, Eldorado dos Carajás, Curionópolis, Parauapebas e Canaã dos Carajás.	13
Figura 3: a) Localização da Província Minera de Carajás. b) Mapa geológico do Domínio Carajás. (Modificado de Vasquez <i>et al.</i> 2008).	14
Figura 4: Coluna cronoestratigráfica de parte da Serra Norte (Bacia Carajás). Modificado de Macambira <i>et al.</i> (1990).	15
Figura 5: Quadro evolutivo esquemático para a região de Carajás, no período entre 2,8 Ga e 1,9 Ga proposto por Pinheiro (1997).	19
Figura 6: Mapa das principais estruturas neotectônicas da região sudeste do Pará. Em vermelho destaque para a área de trabalho (Costa <i>et al.</i> , 1996).	22
Figura 7: Imagem Landsat 8 com composição RGB 8, 7 e 3 do sigmoide de Carajás. Destaque para a região de concentração de cavernas.	23
Figura 8: Modelo para movimentação dos splays da Falha Carajás e quebra do corpo de minérios ferro, sem escala. Fonte: Macambira 2003.	23
Figura 9: Mapa Geológico de Rezende e Barbosa (1972) na escala de 1:25.000. Apresenta dados litológicos e estruturais adquiridos sobre o minério de ferro de Carajás.	24
Figura 10: Principais propriedades a serem analisadas para definição dos padrões de drenagem objetivando identificar parâmetros físicos do terreno de acordo com Soares & Fiori (1976).	27
Figura 11: Principais tipos de padrão de drenagem: (a) dendrítica; (b) treliça; (c) retangular; (d) paralela; (e) radial e (f) anelar. Howard (1967).	28

CAPITULO II

Figura 1: Coluna cronoestratigráfica de parte da Serra Norte (Bacia Carajás). Modificado de Macambira <i>et al.</i> (1990).	35
Figura 2: Mapa de localização associado ao mapa geológico de Resende e Barbosa (1972) na escala de 1:25000.	37
Figura 3: Mapa de drenagem.	39
Figura 4: Mapa de lineamentos de drenagem	40

Figura 5: Diagrama de rosetas obtido a partir de 271 direções de condutos de 94 cavernas em a. Em b, o mesmo diagrama, agora com 1511 direções de canais de primeira ordem da rede de drenagem.	41
Figura 6: Mapa de localização das cinco cavernas selecionadas.	42
Figura 7: Fotos das duas entradas. a) entrada localizada a oeste. b) entrada situada na porção leste da caverna.....	42
Figura 8: Feições litoestruturais. a) e b) fotos da FFB com bandas de hematita mm a cm, nos espaços entre as bandas nota-se impregnação por material argiloso. c) fratura N40°/60NE marcando a formação de um conduto que interliga duas galerias. d) fratura N40°/70NE na canga. e) dobras na FFB.	44
Figura 9: a) Em a, o mapa geoestrutural da caverna N4E_0014. b) diagrama de polos correspondente a 10 medidas de bandamento. c) diagrama de rosetas com 24 medidas de fraturas.....	45
Figura 10: foto da entrada da caverna N4E_0021.....	456
Figura 11: Feições litoestruturais. a) foto da FFB com bandamento levemente arqueado. b) foto da canga com maior nível de deformação e alteração. c) dobras em Chevron no mineiro de ferro na entrada. d) planos de fraturas ortogonais seccionando o bandamento. e) e f) plano de fratura subvertical.	467
Figura 12: Em a, o mapa geoestrutural da caverna N4E_0021. b) diagrama de polos correspondente a 5 medidas de bandamento. c) diagrama de rosetas com 13 medidas de fraturas.....	478
Figura 13: Fotos da entrada da caverna. a) entrada principal com pequeno desenvolvimento. b) entrada suspenas.....	49
Figura 14: Feições litoestruturais. a) e b) família de fraturas N340°/80NE seccionando o bandamento N80°/40NW. c) e d) família de fraturas N340°/70NE seccionando o bandamento N40°/30NW. e) e f) fraturas N40°/Subvertical preenchidas por material ferruginoso. g) e h) dobra na Formação Ferrífera Bandada..	50
Figura 15: Em a, o mapa geoestrutural da caverna N4E_0033. b) diagrama de polos de 13 medidas de bandamento. c) diagrama de rosetas com 33 medidas de fraturas..	51
Figura 16: Foto da entrada da caverna N4E_0092.....	51
Figura 17: Feições litoestruturais. a) foto da FFB mostrando as bandas de hematita intercaladas com espaços vazios. b) bandamento dobrado. c) famílias de fraturas no perpendiculares ao plano do bandamento. d) fratura subvertical preenchida por sílica	

seccionando a FFB. e) e f) fratura N350°/40SW cortando a FFB dobrada. g) e h) mostrando o rompimento no paralelo ao plano do bandamento.....	53
Figura 18: Em a, o mapa geoestrutural da caverna N4E_0092. b) diagrama de polos correspondente a 9 medidas de bandamento. c) diagrama de rosetas com 20 medidas de fraturas.....	54
Figura 19: Fotos das entradas da caverna N4E_0093. a) entrada na porção nordeste. b) a sudoeste da caverna.. ..	55
Figura 20: Feições litoestruturais. a) e b) foto do bandamento na FFB. c) e d) fraturas perpendiculares e paralelas ao plano de bandamento, respectivamente.	56
Figura 21: Em a, o mapa geoestrutural da caverna N4E_0093. b) diagrama de polos correspondente a 12 medidas de bandamento. c) diagrama de rosetas com 17 medidas de fraturas.....	56
Figura 22: a) diagrama de polos correspondente a 49 medidas de bandamento coletadas nas cinco cavernas. b) diagrama de rosetas com 107 medidas de fraturas para as mesmas cavernas.. ..	57

SUMÁRIO

CAPÍTULO I	7
1 - INTRODUÇÃO	8
1.1 - ESTRUTURA DA PESQUISA	9
1.2 - JUSTIFICATIVA	9
1.3 - OBJETIVOS	10
1.3.1 - Principal:.....	10
1.3.2 - Específicos:	10
1.4 - MATERIAIS E MÉTODOS	11
1.4.1 - Pré-campo	11
1.4.2 - Fase de Campo	11
1.4.3 - Tratamento dos dados	12
1.5 - LOCALIZAÇÃO E ACESSO	12
2 - CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL	13
2.1 - BACIA CARAJÁS	14
2.2 - MODELOS TECTÔNICOS	18
2.3 - NEOTECTÔNICA DA REGIÃO AMAZÔNICA	20
3 - CONTEXTUALIZAÇÃO LOCAL	22
4 - MORFOTECTÔNICA	25
4.1 - ANÁLISE DE DRENAGEM	25
4.2 - ANÁLISE DE LINEAMENTOS.....	29
CAPITULO II.....	30
ARTIGO.....	30
CAPITULO III	62
1 - CONSIDERAÇÕES FINAIS	62
2 – REFERENCIAS	63

CAPITULO I

1 - INTRODUÇÃO

O ambiente cavernícola é ainda tema pouco debatido se levada em consideração sua complexidade. Simmons (1963) publicou um trabalho pioneiro intitulado “Cavernas em canga no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil”. Até então, tudo que se sabia a respeito de cavernas estava relacionado a calcários. Hoje, sabe-se que também podem se formar em arenitos, quartizitos, rochas máficas, minério de ferro e canga.

As cavernas de Carajás ocorrem predominantemente em Formação Ferrífera Bandada (FFB), canga e rochas máficas, estas últimas com menor frequência. A FFB é uma rocha formada pela intercalação de bandas de coloração escura representada por óxidos de ferro, hematita e magnetita e por bandas claras de *chert* e avermelhadas de jaspe (Costa, 2006). A canga é um material que ocorre geralmente recobrando o minério de ferro (termo aplicado ao produto de alteração da FFB composto quase que em sua totalidade por hematita), representa clastos angulosos principalmente de hematita cimentados por uma matriz de consistência argilosa composta essencialmente por hematita e goetita (Maurity & Kotschoubey, 1995).

Estruturas como, planos de bandamento e fraturas são importantes condicionantes no desenvolvimento das cavernas. Em sua grande maioria, ocorrem em cotas altimétricas entre 600 e 700 m. Porém, elas ocorrem desde 350m até 750m (artigo submetido).

Em acordo com Piló e Auler (2009) as cavernas se posicionam geralmente nas quebras de relevo: borda de lagoas; cabeceiras e borda de drenagens; e nas bordas dos platôs, incluindo-se a alta, média e baixa vertente. Quanto à gênese dos principais processos identificados por Dutra (2013) foram erosão, lixiviação, dissolução e biogênese.

Com relação à atividade tectônica recente na região de Carajás, Costa *et al.* (1996) divulgou o quadro neotectônico desenvolvido para a região amazônica. Tais estudos relatam estruturas N-S e E-W que controlam principalmente o padrão de drenagem da região. Contudo, esse estudo é dificultado por ser uma área localizada na parte mais antiga e “estável” do cráton amazônico em uma região intraplaca, onde os choques ocorridos nas bordas da placa Sul-Americana pouco ou nada influenciam.

Cabe ressaltar que essas cavernas são feições morfológicas recentes e em processo de desenvolvimento. Suspeita-se da reativação de antigas linhas de fraqueza por esforços neotectônicos, com a abertura de antigas estruturas como falhas e fraturas, que possibilitaram o fluxo de soluções descendentes e a consequente dissolução da sílica. O padrão de ocorrência

destas pode indicar quais direções foram preferencialmente reativadas, permitindo uma comparação com os esforços que atuam na placa litosférica.

A hipótese aceita até o momento relata que a influência de estruturas descontínuas pode ser esperada por conta da facilidade de percolação que os fluidos encontram nessas estruturas (artigo submetido).

Entre os poucos trabalhos que dissertam sobre o tema é possível destacar os relatórios internos fornecidos pela VALE/SA e os Relatórios, Seminários e *Workshop* do grupo de pesquisa PROCAV (Projeto Cavidades) que relatam a influência de estruturas descontínuas na evolução de cavernas, onde foram analisadas direções de planos de bandamento e fraturas e comparadas às medidas de condutos (principais direções de desenvolvimento das cavernas), evidenciando que a maioria destas, se desenvolve na direção das principais famílias de estruturas.

1.1 - ESTRUTURA DA PESQUISA

O documento foi elaborado seguindo as Normas Complementares 01/14, do Programa de Pós-Graduação em Geologia. No qual é apresentado inicialmente o capítulo I, composto pela parte introdutória do trabalho que compreende o tema da pesquisa, objetivos, matérias e métodos e a localização da área, além da contextualização da área de pesquisa.

O capítulo II é representado pelo artigo intitulado “AVALIAÇÃO ESTRUTURAL E INFLUÊNCIA NEOTECTÔNICA SOBRE CAVERNAS EM FORMAÇÕES FERRÍFERAS, CARAJÁS-PA.”, onde constam os principais resultados.

No capítulo III, encontram-se as considerações finais e conclusões.

1.2 - JUSTIFICATIVA

O decreto 6640/2008 art. 02 estabelece que “A cavidade natural subterrânea será classificada de acordo com seu grau de relevância em máximo, alto, médio ou baixo, determinado pela análise de atributos ecológicos, biológicos, geológicos, hidrológicos, paleontológicos, cênicos, histórico-culturais e socioeconômicos, avaliados sob enfoque regional e local”. Neste aspecto entende-se que para a determinação do raio de proteção de uma caverna seria necessária a realização de estudos mais elaborados, o que não ocorreu na maioria delas em Carajás.

O Padrão de Relevância é quem define as empresas quais cavernas são passíveis de exploração e/ou conservação e qual o raio de proteção, aumentando assim o interesse em

trabalhos de cunho Geoespeleológico, uma vez que, um grande número de cavernas encontra-se hospedada no minério de Ferro.

A exploração do minério de ferro ao longo do território nacional impulsionou a Geoespeleologia buscando o entendimento não só dos espeleotemas (*spelaion*= cavidades e *temas* = depósito), mas também da Geomorfologia, dos litotipos associados e a estruturação destes. Entretanto, os estudos relacionados a essa área do conhecimento ainda encontram-se em estágio pouco avançado necessitando assim de estudos sistemáticos mais aprofundados que possam contribuir na elucidação do tema proposto, podendo posteriormente auxiliar novas pesquisas a esse respeito.

Estudos Geoespeleológicos são grande importância no que diz respeito à caracterização de cavernas, sendo a Geologia Estrutural extremamente necessária neste sentido, pois estuda descontinuidades que podem de alguma forma influenciar no desenvolvimento destas feições, assim como a Espeleologia (*spelaion*= cavidades e *logos* = estudo), que por sua vez objetiva o uso sustentável do ambiente cavernícola por intermédio de mecanismos que efetivamente contribuam para a sua conservação.

Assim, o trabalho busca auxiliar no conhecimento mais aprofundado a cerca da gênese e evolução de cavernas em minério de ferro, no qual seus resultados podem ser aplicados também a cavernas em outros litotipos.

1.3 - OBJETIVOS

1.3.1 - Principal:

- Realizar a caracterização estrutural de cavernas na mina N4E através de medidas principalmente de fraturas e bandamentos, para buscar compreender a relação existente entre a gênese e evolução dessas, com a estruturação regional e/ou local da Serra Norte na Bacia Carajás.

1.3.2 - Específicos:

- Confecção dos mapas: Geológico, com a localização das cavernas a serem estudadas; mapa de drenagem para buscar a relação dos canais com as cavernas; mapa de lineamentos de relevo e drenagem, com objetivo de entender o contexto estrutural; e por fim os mapas Geoestruturais de cada caverna selecionada.
- Análise da forma das cavernas e sua relação com estruturas descontínuas;
- Elaboração de estereogramas de fraturas e bandamentos;

- Elaboração de estereogramas de canais de primeira ordem e das direções dos principais condutos das cavernas;
- Interpretação desses dados.

1.4 - MATERIAIS E MÉTODOS

1.4.1 - Pré-campo

Foi realizada uma pesquisa bibliográfica a fim de se fazer um levantamento de informações sobre Geologia Regional e local de Carajás, com o objetivo de entender a estruturação da região. Imagens da missão *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) também foram utilizadas, além, de dados fornecidos pela VALE/SA, entre eles, imagens de radar Lidar (*Light Detection And Ranging*) para geração dos Modelos Digitais de Terreno (MDT) e relatórios com medidas estruturais e as principais características das cavernas de Serra Norte, tanto no interior quanto fora. Dados coletados durante mapeamento geológico realizado na região, por Rezende e Barbosa (1972), Araújo & Maia (1991), Vasquez *et al.* (2008) e CARSTE (consultores associados à VALE/SA 2011) dão suporte ao trabalho por meio de medidas estruturais, descrição de características litológicas e altimétricas das cavernas, além de mapas geológicos.

Foram analisadas as principais direções dos canais de drenagem de menor ordem, de acordo com o conceito de hierarquia estabelecido por Strahler (1952), onde os canais de ordem menor são os de primeira e segunda ordem. Posteriormente, as direções foram comparadas com os condutos de cavernas, a fim de estabelecer, se possível, uma correlação com eventos neotectônicos para o desenvolvimento dessas feições.

1.4.2 - Fase de Campo

Foram realizadas campanhas de campo, com visita a algumas cavernas em Serra Norte na mina N4E, para caracterização geoestrutural. Durante a campanha de campo, foi de extrema importância a coleta de medidas de atitude de fraturas e bandamentos, sempre com cuidado para que a bússola sofra o mínimo possível de influência do ferro presente em grande quantidade nas cavernas. Desta forma torna-se possível analisar se uma determinada caverna possui evolução controlada por alguma estrutura, ou se foi apenas desenvolvida pela acomodação de blocos rochosos, sem apresentar qualquer controle, seja estrutural, litológico ou mesmo estratigráfico.

1.4.3 - Tratamento dos dados

Foram utilizados os *softwares*, *Google Earth*, *ArcGis® 10.1* e *Global Mapper® v.10.1* para confecção dos mapas. Também foram responsáveis por auxiliar no reconhecimento e interpretação de grandes estruturas através das imagens Lidar, SRTM e Landsat 8. Já o *software Surfer v.10* foi usado para confecção e visualização de mapas em 3D com objetivo de reconhecer o posicionamento das cavernas quanto ao relevo da região e observação de grandes estruturas. Por sua vez, o programa *Corel Draw v.x5* foi aplicado à edição de figuras.

Os dados de campo como medidas estruturais, foram tratados nos *softwares Spring 5.1.8* e *Open Stereo 1.2.*, usados para produção dos estereogramas e diagramas de rosetas, com intuito de observar as principais famílias de estruturas presente no interior e fora das cavernas.

A Figura 1 encontra-se disponibilizado o fluxograma com a listagem e ordenamento das atividades realizadas.

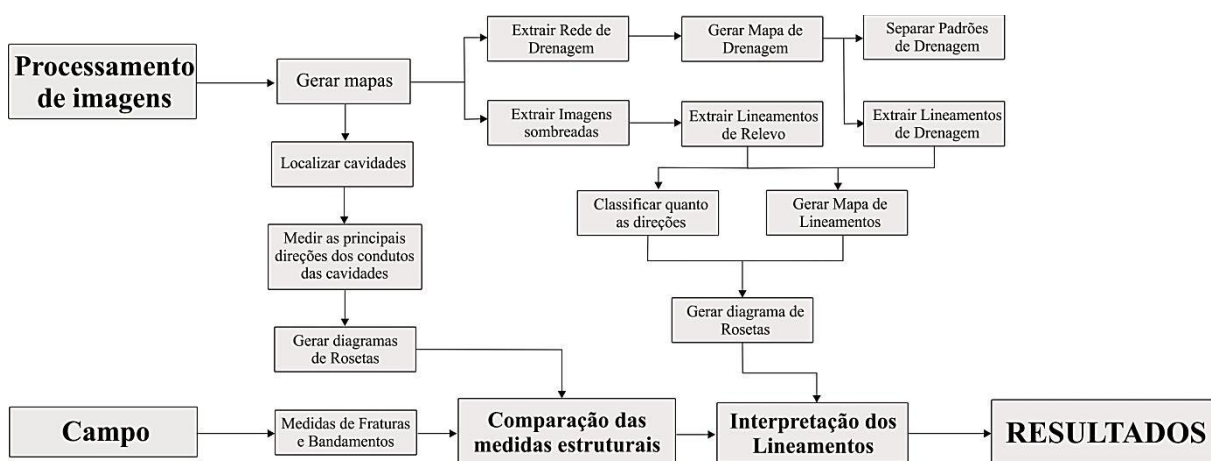


Figura 1: Fluxograma de atividades.

1.5 - LOCALIZAÇÃO E ACESSO

A área de pesquisa encontra-se localizada na Serra do Carajás mais precisamente Serra Norte, inserida na Bacia Carajás, Província Mineral de Carajás região sudeste do Pará nas adjacências do município de Parauapebas. O acesso pode ser feito através de transporte aéreo até o aeroporto do núcleo urbano de Carajás, por via férrea ou ainda por via terrestre pavimentada, partindo do município de Marabá no sudeste do Pará, pela BR-155 por 100 km até Eldorado dos Carajás, prosseguindo a partir daí pela PA-275 por 65 km até Parauapebas, em seguida segue pela rodovia Raimundo Mascarenhas em um percurso de 30Km até a entrada das minas de Serra Norte (Figura 2).

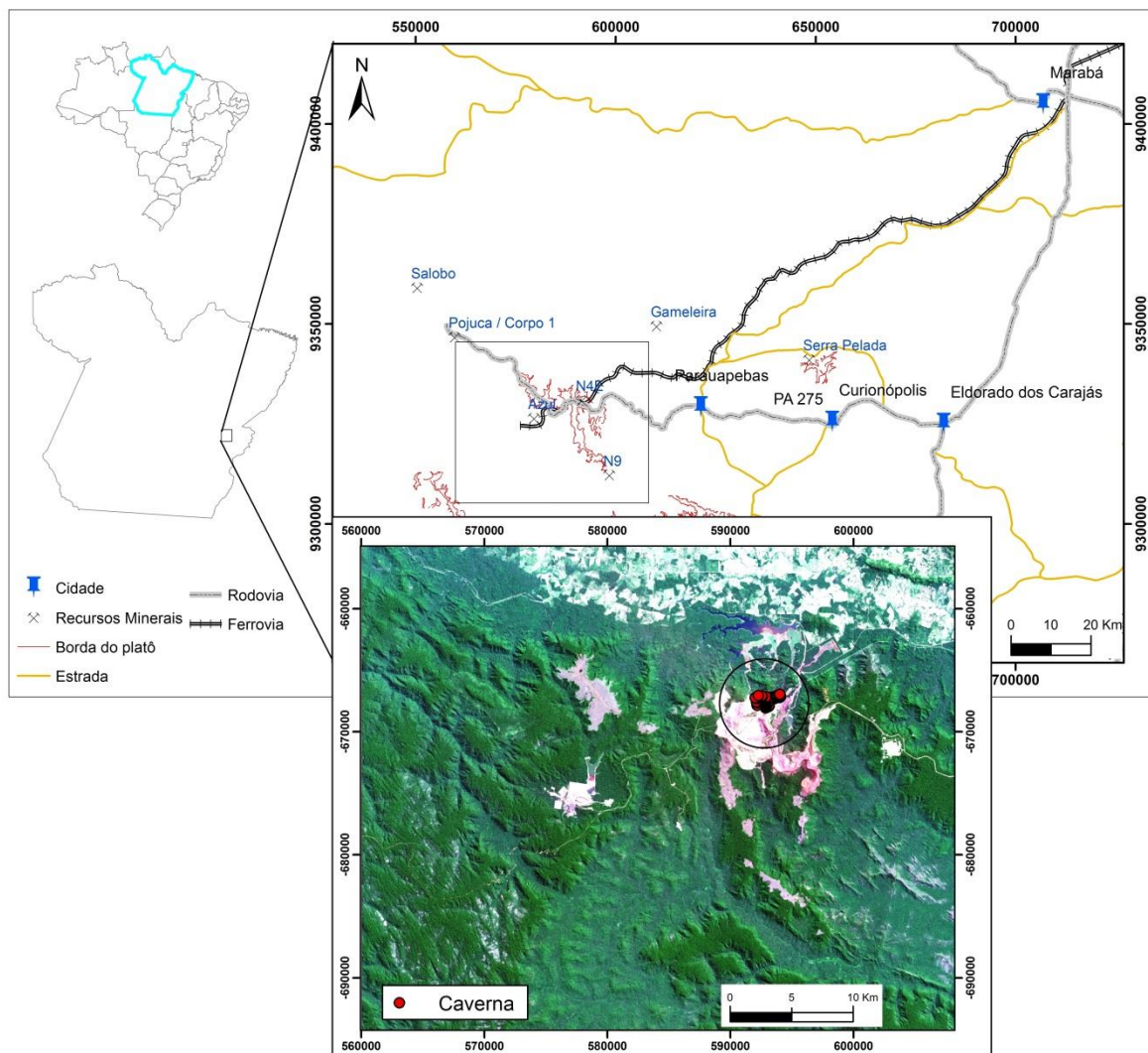


Figura 2: Mapa de Localização da área de trabalho em Serra Norte com relação aos municípios de Marabá, Eldorado dos Carajás, Curionópolis, Parauapebas e Canaã dos Carajás.

2 - CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL

A Província Mineral de Carajás (PMC) localizada no sudeste do Pará é uma das mais importantes do mundo principalmente em termos metalogenéticos, pois é dotada de inúmeras mineralizações principalmente de ferro. Representa a porção mais antiga do Cráton Amazônico e possui características geológicas singulares, sendo gerada, reativada e tectonicamente estabilizada ainda no Arqueano. De acordo com Dall'Agnol *et al.* (2006) e Feio (2011) a PMC é constituída por dois Domínios Tectônicos, um a sul chamado de Domínio Rio Maria e outro a norte denominado Domínio Carajás (Figura 3a e 3b).

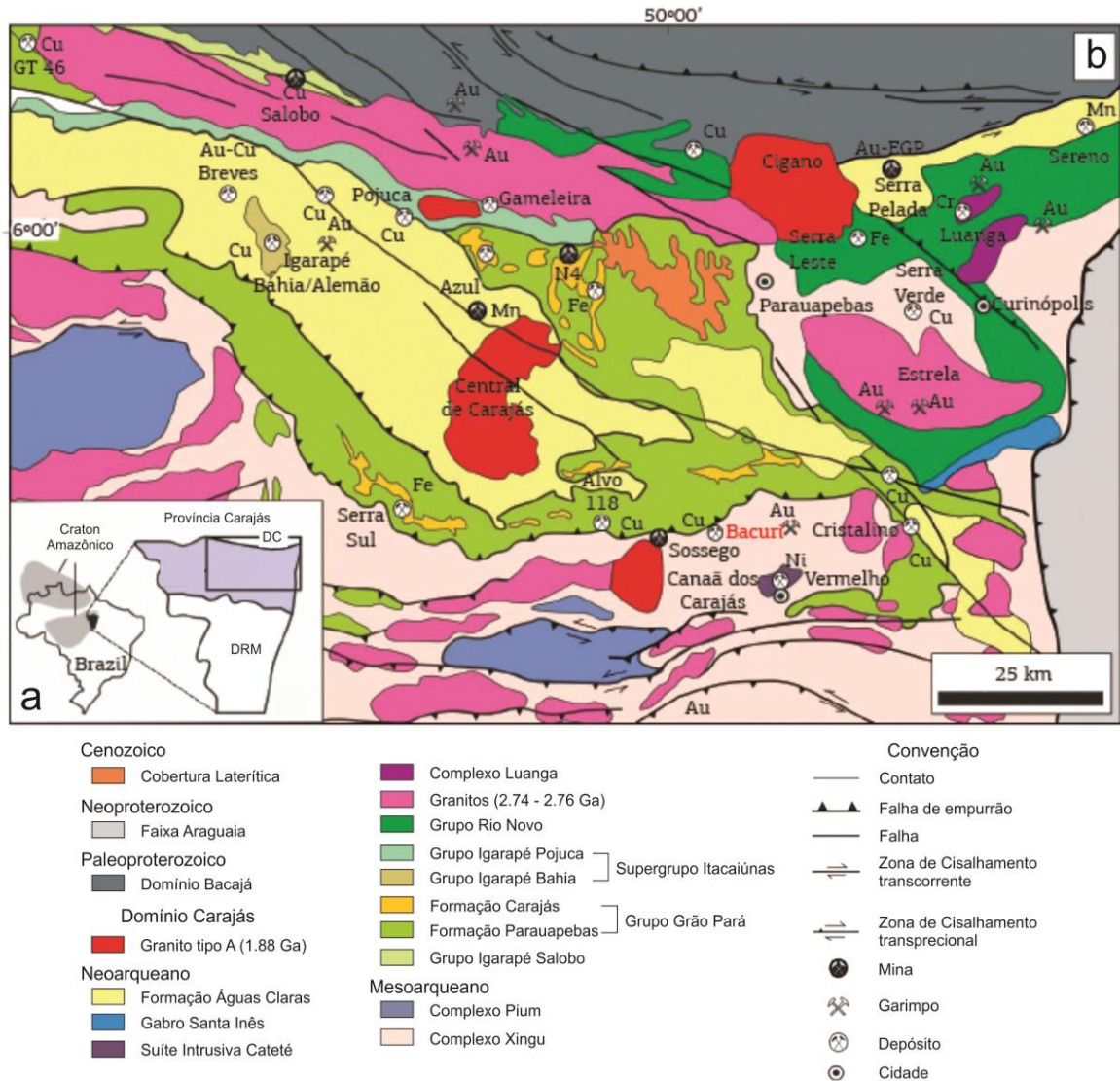


Figura 3: a) Localização da Província Minera de Carajás. b) Mapa geológico do Domínio Carajás. (Modificado de Vasquez *et al.* 2008).

Entre os dois, há também um subdomínio de transição, o qual apresenta características similares aos dois Domínios. Os limites entre os blocos tectônicos permanecem incertos. O Domínio Carajás engloba a Bacia Carajás onde está localizada a área de estudo e o Subdomínio de Transição, já o Domínio Rio Maria por sua vez seria correspondente ao Terreno Granito-*Greenstone* de Rio Maria.

2.1 - BACIA CARAJÁS

O preenchimento da Bacia corresponde a Sequência Arqueana formada pelo Complexo Xingu, Grupo Pojuca e Grupo Grão Pará, Sequência Proterozoica constituída pela Formação Igarapé Cigarra, Gabro Santa Inês e Granito Serra dos Carajás, e a Sequência Fanerozoica que corresponde aos Corpos Máficos Intrusivos (Macambira 2003) (Figura 4).

ÉON	ERA	UNIDADE		DESCRIÇÃO
FANEROZOICO	PALEOZOICO	CORPOS MÁFICOS INTRUSIVOS		Diques e soleiras de diabásio
PROTEROZOICO	INFERIOR	GRANITO SERRADOS CARAJÁS		Granitos a anfibólitos e/ou biotita
		GABRO SANTA INÊS		Gabro grosseiro hidrotermalizado
		FORMAÇÃO IGARAPÉ AZUL		Arenitos com níveis conglomeráticos e siltitos intercalado
ARQUEANO	GRUPO GRÃO PARÁ	Formação Igarapé Boa Sorte		Siltitos e folhelhos carbonáticos com arenitos subordinado
		Formação Igarapé Cigarra		Basaltos, tufos, BIF, <i>chert</i> , quartzos e quartzos arenitos
		Formação Carajás		BIF's com soleiras de basalto
		Formação Parauapebas		Basaltos e riolitos
	GRUPO POJUCA	Formação Gameleira		Meta-wackes e meta-siltitos
		Formação Corpo 4		BIF's (sulfeto) e xistos
		Formação Bueno		Anfibolitos BIF's (óxido)
	COMPLEXO XINGU		Gnaisses granodioríticos a tonalíticos, anfibolitos e trondjemitos	

Figura 4: Coluna cronoestratigráfica de parte da Serra Norte (Bacia Carajás). Modificado de Macambira *et al.* (1990).

O Complexo Xingu inclui gnaisses tonalíticos, trondjemitos, granodioritos, granitos e anfibolitos de alto grau (Hirata *et al.* 1982) e representava a maior extensão do embasamento da Bacia Carajás, se estendendo até o Terreno Granito-*Greenstone* de Rio Maria. Entretanto, granitos intrusivos neste complexo estão sendo individualizados ao longo do tempo, atualmente o Complexo Xingu encontra-se restrito ao Domínio Carajás (Vasquez *et al.* 2008). Avelar *et al.* (1999) obtiveram idade de 2972 ± 16 Ma (Pb/Pb em zircão) para um gnaiss de composição granodiorítica, enquanto Machado *et al.* (1991) obtiveram idades de 2859 ± 2 e 2860 ± 2 Ma, em um leucossoma, interpretado como último episódio de migmatização que afetou o complexo. Recentemente em trabalho realizado em Serra Leste Barros *et al.* (2010) interpretaram tal idade como sendo a de cristalização de alguns granitoides da região. No intuito de melhor compreender a história evolutiva da Província Carajás, a área de ocorrência deste complexo veio sendo significativamente reduzida nas últimas décadas, principalmente no Domínio Rio Maria e norte do Domínio Carajás, dando lugar ao surgimento de novas unidades.

De acordo com Macambira (2003) o Grupo Pojuca (GP) é composto estratigraficamente pelas formações Bueno, Corpo 4 e Gameleira e corresponde a uma sequência metavulcano-sedimentar arqueana, composta na base por anfibolitos hidrotermalizados, com intercalações de metarenitos e metasiltitos, além de xistos e formação ferrífera, seccionadas por diques de metagabros e metadiabásios (Macambira 2003). Mineralizações de Cu, Au e Zn encontram-se associadas (Hirata *et al.* 1982). Rochas do GP ocorrem sobre o Grupo Grão Pará (GGP) em uma região a norte da mina N4E, isso ocorre devido a presença de uma falha de empurrão de direção E-W, uma vez que o GP é interpretado como mais antigo que o GGP com base principalmente em datações. A base do Grupo Pojuca corresponde à Formação Bueno composta por BIFs no contato com o Complexo Xingu, além de anfibolitos com espessura média de afloramentos de 1000 m. A Formação Corpo 4 possui BIFs de fácies sulfeto e silicato na base, e xistos de composições anfibólio-quartzo-granada, quartzo-muscovita-andaluzita-biotita, grunerita-quartzo e biotita-anfibólio no topo em contato concordante com a base. No topo do Grupo Pojuca ocorre a Formação Gameleira representada principalmente por meta-quartzo *wackes*, meta-*wackes* arcossianos e meta-siltitos com andaluzita (Macambira 2003).

O Grupo Grão Pará preenche a maior parte da Bacia Carajás sendo composto por uma sequência Vulcano-sedimentar representada estratigraficamente pela Formação Parauapebas, Carajás, Igarapé Cigarra e Igarapé Boa Sorte (Macambira 2003).

A Formação Parauapebas reúne rochas vulcânicas de sequências bimodais de basaltos e riolitos com 4 a 6 km de espessura (Pinheiro & Holdsworth 1997). As rochas vulcânicas apresentam idade de 2758 ± 39 Ma, obtidas através de U-Pb em zircão, interpretadas como sendo a idade principal do derrame (Gibbs *et al.* 1986). Teixeira *et al.* (1994) propõem que aproximadamente 70% das rochas vulcânicas máficas do Grupo Grão Pará sofreram modificações causadas por hidrotermalismo relacionada a dois principais eventos. O primeiro teria sido devido o contato com água do mar aquecida por vulcanismo durante o Arqueano, enquanto o segundo estaria relacionado a águas meteóricas aquecidas pela colocação do Granito Central de Carajás e outros da mesma suíte, isto no Paleoproterozoico. Macambira (2003) com base em análises de mais de cem amostras dividiu as rochas máficas do GGP em três grupos: Basaltos com mineralogia e texturas ígneas preservadas e pouco ou nada hidrotermalizados; Basaltos fortemente hidrotermalizados e; Meta-basaltos. Em todas foram evidenciadas texturas ígneas preservadas. As rochas vulcânicas félsicas possuem raras ocorrências apesar de grandes exposições no platô N5 e foram descritas por Gibbs *et al.*, (1986) como riolitos em derrames homogêneos, lapilli tufos e tufos a cristal e vítreos. Os

autores calculam que as rochas vulcânicas félsicas constituem cerca de 10-15% dos afloramentos de rochas vulcânicas na Serra Norte.

A Formação Carajás está em contato com a Formação Parauapebas e mostra intercalações entre as rochas vulcânicas máficas e a formação ferrífera bandada (Gibbs & Wirth 1990). Volumes significantes de rocha básica estão encaixados nas rochas ferríferas, destacando-se diques e outros corpos intrusivos. É difícil acessar a mineralogia original dessas rochas, pois seus afloramentos se mostram intensamente alterados por intemperismo e possivelmente também por atividade hidrotermal. As BIF's são predominantes nessa formação sendo descritas como jaspilito meso e microbandado formado por bandas de jaspe (*chert* impregnado por hematita microcristalina) e óxidos de ferro depositados em 2.751 ± 4 Ma (Krymsky *et al.* 2002). Além do bandamento composicional, os jaspilitos de Carajás preservam outras estruturas deposicionais, tais como laminação interna plano-paralela, estruturas de escavação e preenchimento (*scour-and-fill*) e esferulitos/grânulos de provável origem orgânica (Meirelles 1986, Macambira 2003).

A Formação Igarapé Cigarra foi proposta por Macambira *et al.* (1990) para o conjunto de rochas denominado por Gibbs *et al.* (1986) como Unidade Superior. Essa unidade possui contato concordante sobre a Formação Carajás, com as camadas de BIF's recobertas por rochas máficas com intercalações de tufos, seguidos por sedimentos clásticos e químicos (Macambira 2003). Esta formação é composta por basaltos alterados hidrotermalmente com textura ígnea preservada semelhante aos da Formação Parauapebas, além de serem indistinguíveis química e mineralogicamente, no entanto, os da Formação Parauapebas parecem ser mais magnesianos que os da Formação Igarapé Cigarra. Esta formação parece marcar o fim do vulcanismo, sedimentação química e contribuição clástica no Grupo Grão Pará, iniciando desta forma uma sequência regressiva.

A Formação Igarapé Boa Sorte é representada por siltitos com intercalações de folhelhos e níveis arenosos subordinados. Foi definida por Macambira *et al.* (1990) e correspondente a unidade do topo do Grupo Grão Pará. Da mesma forma Gibbs e Wirth (1990) interpretaram esse pacote de rocha como a parte superior do GGP. Entretanto, Nogueira (1995) consideram as formações Igarapé Cigarra e Igarapé Boa Sorte como membro inferior da Formação Águas Claras, depositada discordantemente sobre o Grupo Grão Pará.

A Formação Igarapé Azul foi definida por Macambira *et al.* (1990) que é equivalente ao Membro Superior da Formação Águas Claras proposta por Nogueira *et al.* (1995). Esta formação ocorre discordantemente sobre o GGP, sendo composta principalmente por arenitos fluviais. Os principais litotipos são quartzo-arenito, quartzo-*wackes*, conglomerados e siltitos

em menor proporção. Na parte saprolítica do Granito Central ocorrem vários xenólitos de arenitos, assim como nas proximidades da borda do Gabro Santa Inês foram encontrados hornfels desenvolvidos nos arenitos da Formação Igarapé Azul.

O Gabro Santa Inês (DOCEGEO 1988, Pinheiro 1997) forma um corpo constituído por gabros porfiríticos, leucogabros, microgabros e anortositos de fraca foliação e alongado segundo NE-SW no extremo oeste do Domínio Carajás encaixado nas rochas da Formação Igarapé Azul. A idade desta unidade é incerta, no entanto Vasquez *et al.* (2008) dataram diques e corpos máficos correlacionados a este grabro e que cortam o Supergrupo Itacaiúnas de 2,71 Ga (Meireles *et al.* 1982, Macambira *et al.* 1990, Santos 2002). Por outro lado, a datação de uma amostra de gabro por K-Ar revelou idade de 1.976 ± 37 para esta unidade (Macambira 1990).

O Granito Serra dos Carajás é composto por três corpos principais, Central, Itacaiúnas também denominado de Granito Pojuca por Machado *et al.* (1991) e o Granito Barragem, esse conjunto de granitoides constitui uma suíte chamada de Suíte Serra dos Carajás. O Granito Central corresponde a um sienogranito datado de 1.880 ± 2 por Machado *et al.* (1991). O Granito Itacaiúnas é um granito propriamente dito datado por Machado *et al.* (1991) de 1.874 ± 2 . Por último o Granito Barragem que ainda não foi estudado em detalhe.

2.2 - MODELOS TECTÔNICOS

A Bacia Carajás faz parte do Sistema Transcorrente Carajás descrito como uma estrutura sigmoidal, alongado na direção WNW-ESE, de acordo com Araújo e Maia (1991). Alguns modelos tectônicos foram propostos com o objetivo de descrever a evolução da região, entre eles destacam-se Costa *et al.* (1995), Pinheiro (1997) e Veneziani *et al.* (2004).

Costa *et al.* (1995) propõe que a região teria se desenvolvido a partir de três episódios termo-tectônicos no Pré-cambriano, segundo estes autores o primeiro evento teria sido responsável pela propagação de zonas de cisalhamento de direção E-W, o segundo evento seria relacionado a uma componente distensiva de orientação NE-SW e o terceiro estaria ligado à formação da Faixa Araguaia.

Pinheiro (1997) propõe que na região de Carajás teria ocorrido inicialmente um evento deformacional transpressivo sinistral dúctil que teria afetado o embasamento, em seguida, um evento extensivo teria propiciado a formação do Grupo Grão Pará e da Formação Águas Claras, as rochas do Grupo Grão Pará teriam sido metamorfasadas e/ou hidrotermalizadas em condições de baixo grau em torno de 2,7 Ga, posteriormente, um evento transtensivo dextral teria formado os sistemas Carajás e Cinzento e também seria responsável pela nucleação da

Falha Carajás. Há 2,5 Ga um evento transpressivo sinistral deforma as rochas próximas à Falha Carajás e inverte, fracamente, a Bacia Carajás. Já no Paleoproterozoico (1,88Ga), um evento extensivo ou transtensivo possibilita a intrusão de plútons graníticos e de diques (Figura 5).

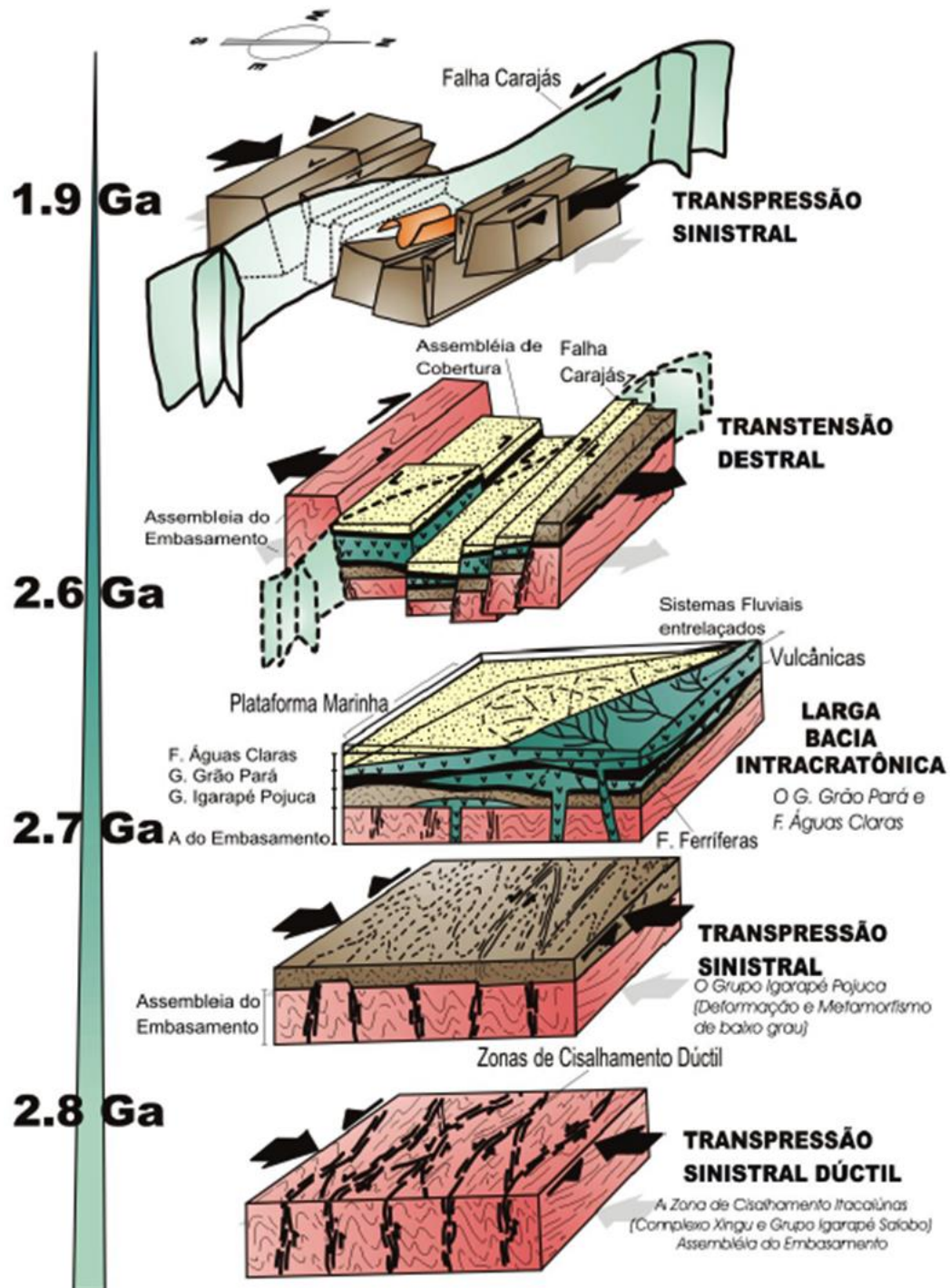


Figura 5: Quadro evolutivo esquemático para a região de Carajás, no período entre 2,8 Ga e 1,9 Ga proposto por Pinheiro (1997).

Veneziani *et al.* (2004) se basearam em dados de sensores remotos, aerogeofísica, além de dados coletados em campo para definir as seguintes fases de movimentação/deformação ao longo do Cinturão Itacaiúnas: transpressiva sinistral com direção principal orientada segundo WNW-ESE, vergência de NE para SW e o desenvolvimento de zonas de cisalhamento de natureza dúctil, onde o cisalhamento progressivo não coaxial afetou as rochas do embasamento; transpressiva oblíqua, com direção principal orientada em torno de WNW-ESE e vergência de NNW para SSE que proporcionaram o desenvolvimento de zonas de cisalhamento dúcteis a rúpteis – dúcteis, com inversão de movimentos em relação à primeira fase, ao longo das antigas linhas de fraquezas crustais; transpressiva rúptil, localmente transtensiva, sinistral, com direção principal orientada em torno de N70W e vergência de NE para SW, com o desenvolvimento/reativação das antigas linhas de fraquezas crustais sob a forma de falhas transcorrentes, cujos principais exemplos são os sistemas de falhas de Carajás e Cinzento; reativação generalizada com movimentação principalmente na vertical e, secundariamente, lateral (dextral) que afetou, inclusive, as regiões de contato dos granitos anorogênicos, e propiciou a formação da bacia do Gorotire; A partir do Neoproterozoico predominou a cinemática extensional, responsável por reativações das antigas linhas de fraquezas crustais, as quais estão registradas nas ocorrências de sedimentos paleozoicos, intrusivas básicas mesozoicas e coberturas terciárias.

2.3 - NEOTECTÔNICA DA REGIÃO AMAZÔNICA

A neotectônica da região amazônica é marcada por estruturas, sequências sedimentares, padrões de rede de drenagem e sistemas de relevo, cujas características vêm sendo descoberta ao longo do tempo, por conta de varias pesquisa que estão se desenvolvendo sobre essa região (Costa *et al.*, 1996). Os trabalhos pioneiros de neotectônica na Amazônia foram desenvolvidos ainda na década de 50, com os trabalhos de Sternberg, próximo a cidade de Manaus – AM. A presença de sistema de drenagem controlado por falhas, abalos sísmicos em zonas aplainadas e o desenvolvimento de falésias, o levaram a concluir que haveria movimentação recente na superfície amazônica, a qual poderia modificar a paisagem atual.

As sequências sedimentares do Terciário Inferior aparecem sobretudo nas bacias do Amazonas, Marajó e Parnaíba, representando os registros das últimas manifestações do Evento Sul-Atlântico, de caráter extensional, nesse domínio continental intraplaca. Nessas unidades e outras mais antigas desenvolveu-se um perfil laterítico maduro atribuído ao Eoceno-Oligoceno marcando importante período de estabilidade tectônica através do processo de pediplanação, com máximo de aplainamento no Plioceno (Truckenbrodt *et al.* 1991). Os

rios mais antigos da região de Carajás datam deste período com os cursos encaixados principalmente na direção N-S, a exemplo dos rios Tocantins, Araguaia e Xingu.

Posteriormente, sobrevieram processos de estruturação, morfogênese e sedimentação até hoje em atuantes, relacionados com a incidência da Neotectônica, cujo regime tectônico é do tipo transcorrente. Dois pulsos de movimentação transcorrente são reconhecidos, do Mioceno-Plioceno e do Pleistoceno Superior, relacionados a deslocamentos ao longo de feixes de falhas, geração de depósitos sedimentares e controle de padrões de drenagem e sistemas de relevo (Costa *et al.* 1994, 1995).

Na região de Carajás o quadro neotectônico corresponde a um regime transcorrente induzido pelo deslocamento da Placa Sul-Americana para oeste, que foi sobreposto ao regime extensional responsável pela abertura do Oceano Atlântico contemporâneo à instalação da cadeia de montanhas andinas no Mioceno. A estruturação é controlada por um binário E-W, com direção de distensão para NE e compressão para NW (Bemerguy *et al.* 2000).

A partir do Mioceno ocorreu um lento soerguimento, o qual permitiu a superimposição dos rios mais antigos e o início de um novo ciclo de erosão no Plioceno-Pleistoceno. Entretanto, esse novo ciclo não foi suficiente para causar um amplo aplainamento ao retrabalhar a superfície Sul-Americana, que foi preservada graças à cobertura pelo perfil laterítico maturo, o que corresponde atualmente ao relevo dos morros elevados de topo plano (Bemerguy *et al.* 2000). O aplainamento máximo ocorre durante o Pleistoceno associado ao perfil laterítico imaturo de mesma idade, relacionado por Costa (1991) ao retrabalhamento do perfil maturo.

As principais estruturas neotectônicas da região de Carajás mostradas na figura 6 são representadas por três feixes de falhas transcorrentes E-W e dois feixes de falhas normais N-S (Bemerguy *et al.* 2000). Além de descontinuidades NE e NW interpretadas por Costa *et al.* (1991) como estruturas transpressivas e transtensivas, respectivamente em resposta ao movimento principal de caráter transcorrente dextral. Tais estruturas controlam os canais de drenagem mais jovens e perturbam o curso de rios mais antigos condicionando a geração de anomalias de drenagem.

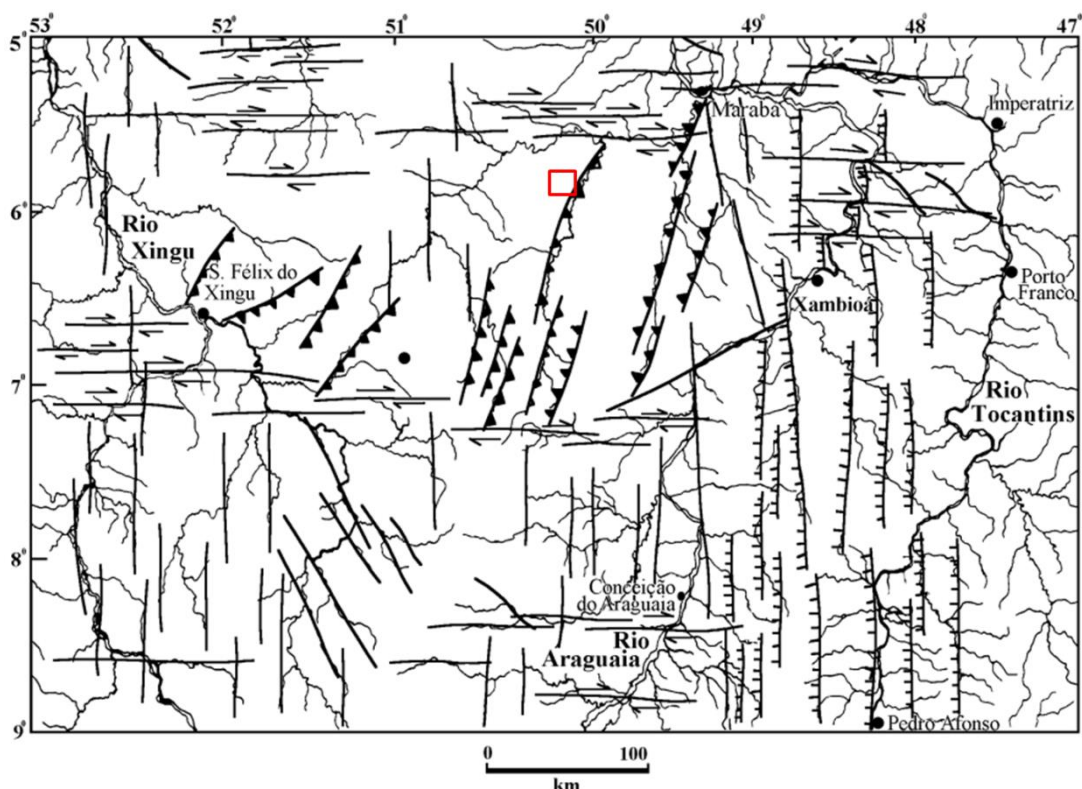


Figura 6: Mapa das principais estruturas neotectônicas da região sudeste do Pará. Em vermelho destaque para a área de trabalho (Costa *et al.*, 1996).

3 - CONTEXTUALIZAÇÃO LOCAL

A Figura 7, apresenta a área de trabalho em uma imagem do satélite Landsat 8. A fotointerpretação foi realizada em uma área de aproximadamente 40 Km², para que se possa ter uma noção mais ampla da estruturação regional. A Serra dos Carajás é dividida em Serra Norte, à norte da falha, e Serra Sul, à sul da falha. A mina N4E está situada na chamada Serra Norte.

A Falha Carajás, teria influenciado a evolução e desenvolvimento da atual configuração do corpo de minério N4E, bem como, as demais regiões nas proximidades, que encontram-se dobradas, falhadas e rotacionadas. A falha de caráter transcorrente sinistral possui cerca de 200 km de extensão com orientação aproximadamente WNW-ESE, composta por feixes de lineamentos descontínuos e anastomosados com formato de estrutura em “Z” (Pinheiro 1997).

Na porção sententrional da falha é possível observar a presença de estruturas do tipo *splays* orientados para N-S, os quais segundo Macambira (2003) teriam controlado a evolução tectônica do corpo de minério como mostra a Figura 8. Os *splays* teriam sido formados durante a movimentação sinistral ao longo do plano de falha.

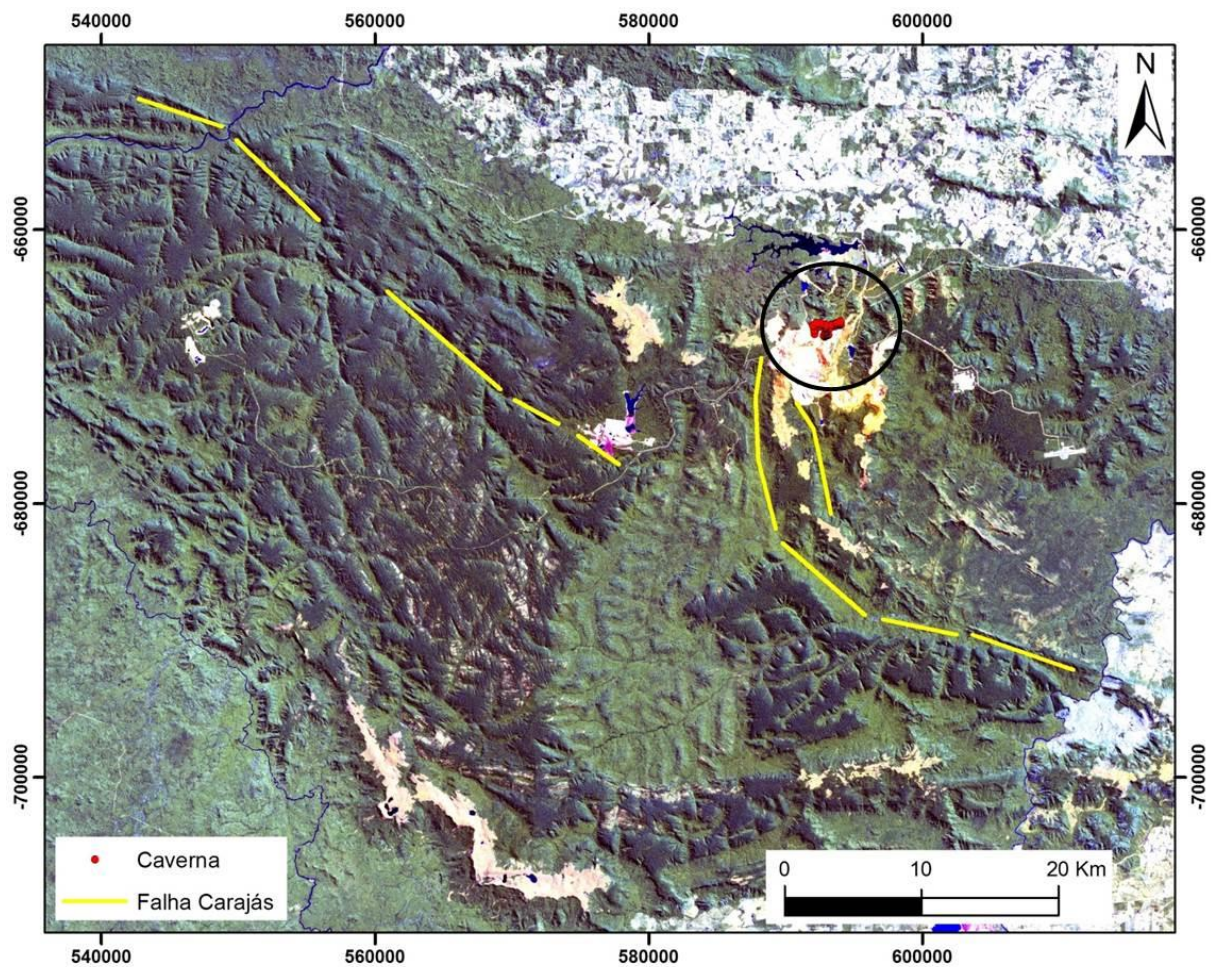


Figura 7: Imagem Landsat 8 com composição RGB 8, 7 e 3 do sigmoide de Carajás. Destaque para a região de concentração de cavernas.

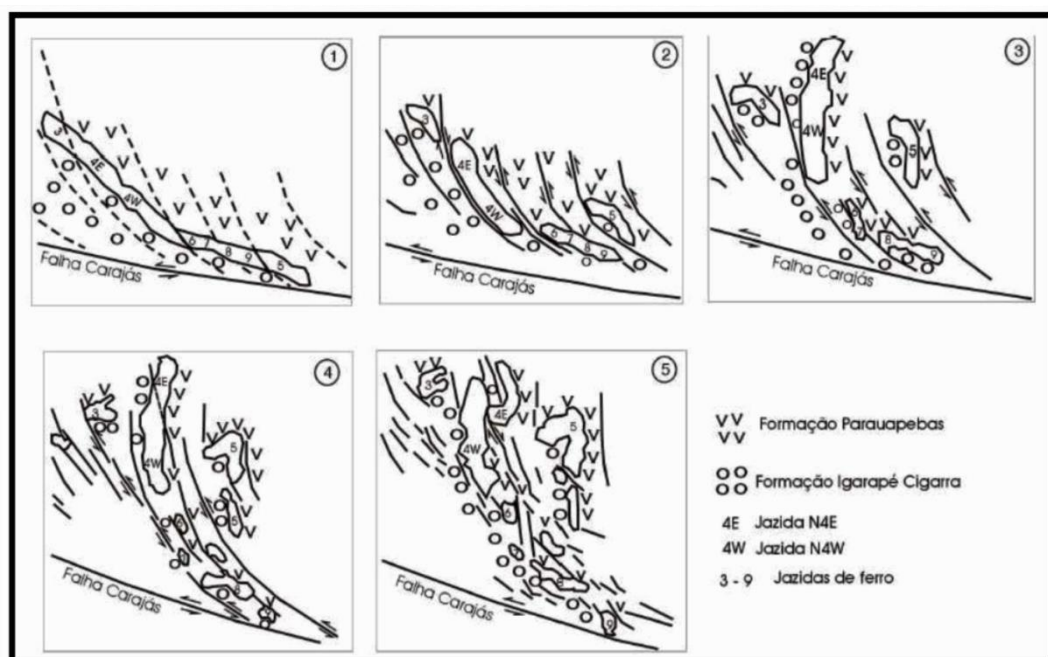


Figura 8: Modelo para movimentação dos splays da Falha Carajás e quebra do corpo de minérios ferro, sem escala. Fonte: Macambira 2003.

O mapa na Figura 9, mostra o trabalho realizado por Rezende e Barbosa (1972) na escala de 1:25000 com enfoque para as regiões de ocorrência de cavernas. Os platôs onde encontra-se a Formação Carajás que hospeda grande parte das cavernas são delimitados por zonas de cisalhamento geradas pelos *splays* da Falha Carajás. As cavernas se concentram em três áreas distintas: porção norte; porção centro-oeste; e na parte sudeste do mapa. Entretanto, para este trabalho será considerada apenas a área de ocorrência na porção norte, que corresponde ao corpo de minério denominado N4E. As cavernas se estabeleceram principalmente sobre a Formação Carajás, em menor quantidade na Formação Igarapé Cigarra, e por vezes, ocorrem na Formação Parauapebas.

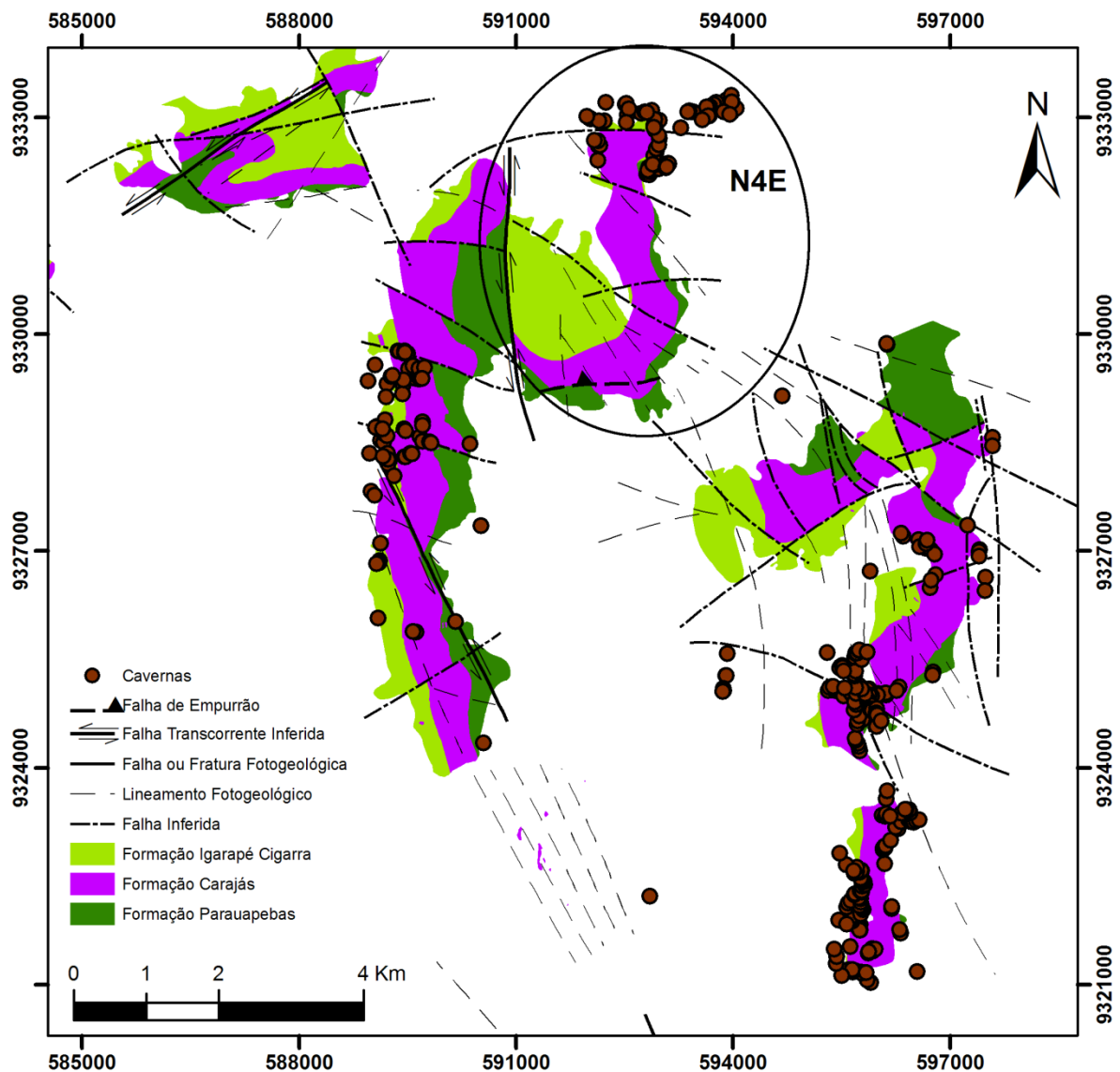


Figura 9: Mapa Geológico de Rezende e Barbosa (1972) na escala de 1:25.000. Apresenta dados litológicos e estruturais adquiridos sobre o minério de ferro de Carajás.

4 - MORFOTECTÔNICA

É ainda um termo muito discutido em sua base conceitual. Segundo Saadi (1991), consiste de processos geradores de formas da paisagem que se desenvolve sob controle da tectônica recente (neotectônica). Estuda as relações de causa-efeito entre a atividade tectônica e a geomorfogênese, considerando os efeitos geomorfológicos da atividade tectônica ativa.

Tradicionalmente, o relevo do Brasil é dividido de acordo com a classificação proposta por Ab'Saber, pioneiro na identificação dos grandes domínios morfoclimáticos nacionais. Sua classificação identifica dois grandes tipos de unidades de relevo no território brasileiro: planaltos e planícies. Na classificação dos Grandes Domínios Paisagísticos Brasileiros, proposta por Ab'Sáber (1973), a região da serra dos Carajás encontra-se inserida no Domínio das Terras Baixas Florestadas da Amazônia, já nas proximidades da faixa de transição para o Domínio dos Cerrados, posicionado mais ao sul. Segundo Boaventura (1974) a Serra do Carajás encontra-se inserida no domínio centro-norte do Planalto Dissecado do Sul do Pará, que é caracterizado por maciços residuais de topo aplainado e conjuntos de cristas e picos interpenetrados por faixas de terrenos rebaixados.

Com respeito à atividade tectônica recente na região de Carajás, Costa *et al.* (1996), divulgaram uma pesquisa propondo o quadro neotectônico desenvolvido para a região amazônica. Eles relatam estruturas N-S e E-W que controlam principalmente o padrão de drenagem da região.

Movimentação tectônica ao longo de falhas muitas vezes se reflete por características geomorfológicas, tais como vales lineares, linhas de cume, quebras de relevo, encostas íngremes de aspecto uniforme, anisotropia regional e inclinação do terreno. Análise de modelos digitais de elevação, por meio de geomorfologia numérica fornece um meio de reconhecer fraturas e caracterizar a tectônica de uma área de uma forma quantitativa.

4.1 - ANÁLISE DE DRENAGEM

Para Etchebehere (2000) e Howard (1967) é por meio de análises da rede de drenagem, dos padrões estabelecidos pelos canais, capturas de drenagens, formas das nascentes, assimetria das bacias e assimetria de depósitos fluviais, entre outros métodos que avaliam o conjunto das drenagens como elemento principal a responder as alterações crustais. Desta forma, tem-se no comportamento da rede de drenagem um componente essencial para pesquisas que envolvam análise fisiográfica da paisagem, como análises morfotectônicas, que constituem uma significativa ferramenta devido às suas respostas imediatas às reativações tectônicas.

Drenagem é uma feição linear negativa produzida por água e capaz de modelar a topografia de uma região. Christofolletti (1980) conceitua como canais de escoamento inter-relacionados que formam uma bacia. Monteiro & Silva (1979) afirmam ser um conjunto da rede hidrográfica com elementos temporários ou permanentes. Mais recentemente Deffontaines & Chorowicz (1991) definiram rede de drenagem como um conjunto de superfícies topográficas subaéreas, as quais são contíguas com pendentes ladeiras acima, em todos os lados, à exceção da direção do fluxo da água.

Christofolletti (1980) define que padrões de drenagem referem-se ao arranjo espacial dos cursos fluviais, que podem ser influenciados em sua atividade morfogenética pela natureza e disposição das camadas rochosas, pela resistência litológica variável, pelas diferenças de declividade e pela evolução geomorfológica da região. Desta forma, o conhecimento mais detalhado do sistema de drenagem pode fornecer informações de grande importância, especialmente quanto à estrutura geológica da área. Variações no estilo estrutural e até mesmo informações sobre fácies litológicas podem ser obtidas a partir da confecção de mapas de drenagem detalhado.

Segundo Soares & Fiori (1976) o Padrão de Drenagem pode ser definido com base em alguns fatores (Figura 10):

- **Densidade de drenagem:** Refere-se à abundância de canais, variando em primeira ordem representada pelos canais sem tributários, ou seja, é quem inicia a rede de drenagem, segunda ordem que surgem da confluência de dois canais de primeira ordem, canais de terceira ordem que surgem da confluência de dois de segunda ordem, e assim segue;
- **Sinuosidade dos elementos texturais de drenagem:** Podem ser classificados em predominantemente curvos; predominantemente retilíneos; e curvos e retilíneos (mistos). Os elementos retilíneos são considerados lineações de drenagem, enquanto a disposição em linha reta das lineações de drenagem constitui um alinhamento de drenagem;
- **Angularidade:** Refere-se ao ângulo de confluência dos elementos de drenagem. Zonas homólogas de drenagem podem ser classificadas em função desta propriedade;
- **Tropia:** Propriedade dos elementos de drenagem se desenvolver segundo uma direção preferencial. Quanto a esta propriedade, podemos considerar a estrutura da drenagem tendo em vista a presença de uma ou mais direções de linhas de drenagem francamente dominantes classificadas em unidirecional, bidirecional, tridirecional e multidirecional;

- **Assimetria:** caracterizada pela presença de elementos com tamanho ou estrutura sistematicamente diferentes, de um lado e de outro, do elemento maior. A assimetria fraca é caracterizada apenas por diferença no tamanho dos elementos e a forte é caracterizada por tamanho e forma;
- **Lineações de drenagem:** são elementos de drenagem fortemente estruturados, retilíneos ou em arco.

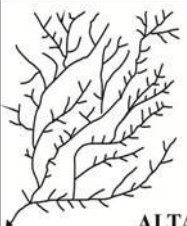
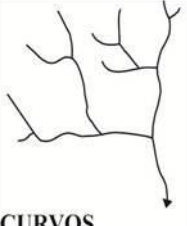
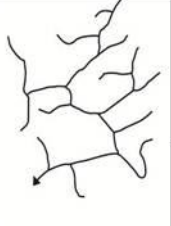

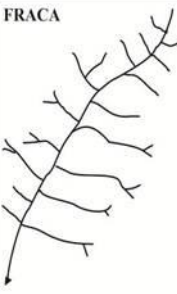
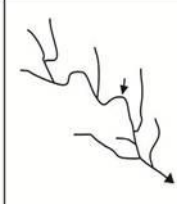
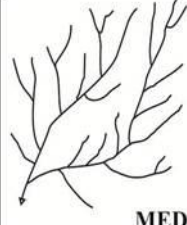
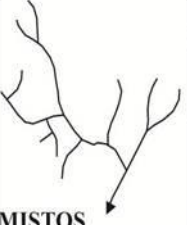

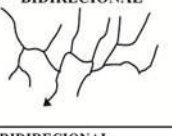
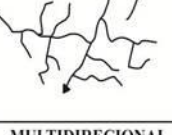
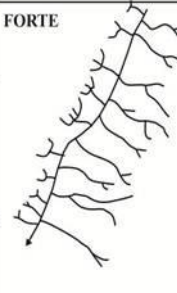
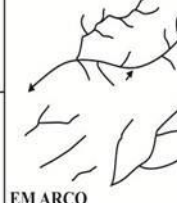
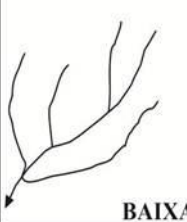
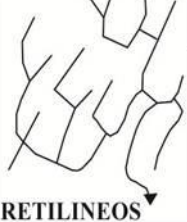
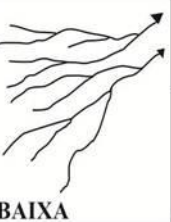
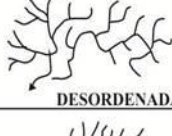

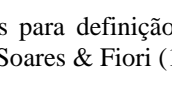

DENSIDADE	SINUOSIDADE	ANGULARIDADE	TROPIA	ASSIMETRIA	FORMAS ANOMALAS
 ALTA	 CURVOS		UNIDIRECIONAL 	FRACA 	 MEANDROS ISOLADOS
 MED.	 MISTOS	 MEDIA	BIDIRECIONAL 		
			TRIDIRECIONAL 	FORTE 	 EMARCO
 BAIXA	 RETILÍNEOS	 BAIXA	MULTIDIRECIONAL 		
			DESORDENADA 		
			ORDENADA 		 COTOVELO

Figura 10: Principais propriedades a serem analisadas para definição dos padrões de drenagem objetivando identificar parâmetros físicos do terreno de acordo com Soares & Fiori (1976).

Segundo Howard (1967), os padrões de drenagem são influenciados por muitos fatores, incluindo variáveis climática e litológica. Mas a estrutura geológica é o principal fator, estabelecendo controles sobre o padrão de drenagem através de inclinações regionais da superfície ou através de descontinuidades estruturais como falhas e fraturas, que podem acarretar assimetria da bacia de drenagem ou mudança brusca do padrão de drenagem.

Portanto, utilizando o critério geométrico da disposição espacial dos rios e seus afluentes, sem qualquer conotação genética, os tipos básicos de padrões de drenagem segundo Howard (1967) são representados na Figura 11: Dendrítico na Figura 11a; Treliça mostrado na 11b; Retangular, 11c; Paralelo que corresponde à 11d; Radial na Figura 11e e; Anelar em 11f.

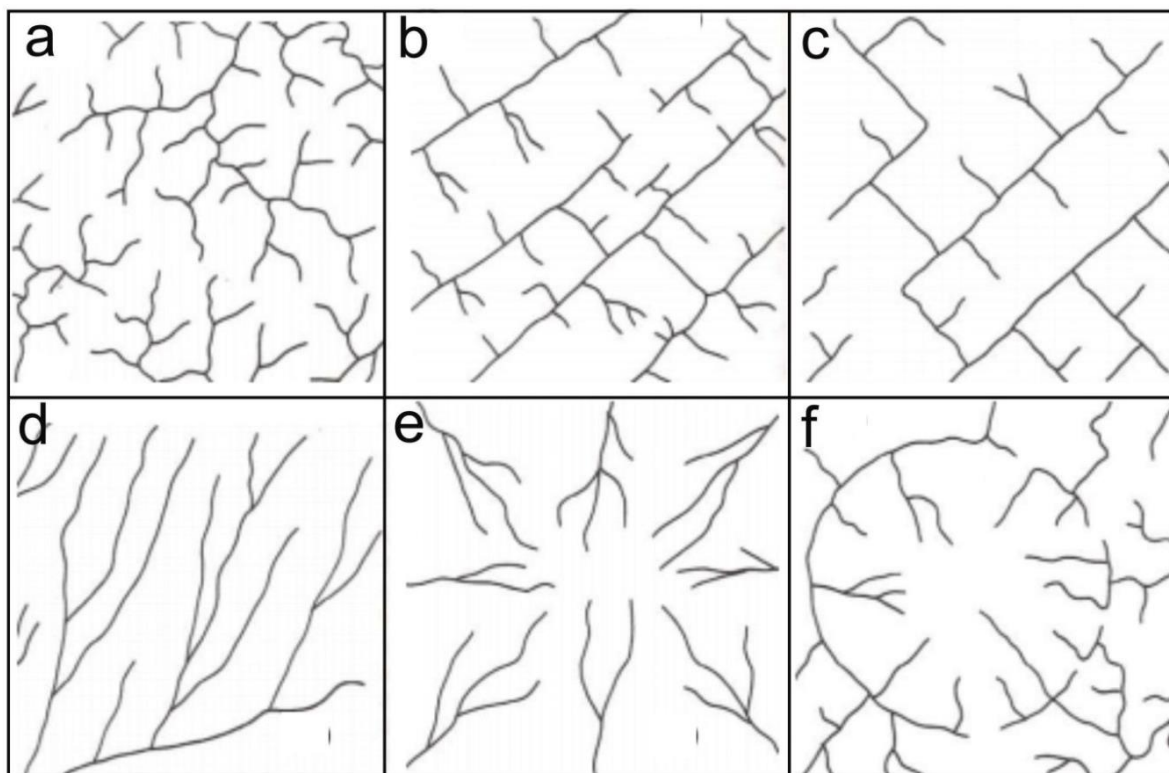


Figura 11: Principais tipos de padrão de drenagem: (a) dendrítica; (b) treliça; (c) retangular; (d) paralela; (e) radial e (f) anelar. Howard (1967).

Alguns padrões de drenagem são indicativos, por si só, de determinada estrutura geológica. Falhas ativas podem ser reveladas pelos padrões treliça e retangular. Zonas de dobramento ativo mostram padrão anelar ou treliça; zonas soerguidas podem ser identificadas pelos padrões distributário, centrífugo, palimpsesto, amorfo, pinado e lagunado (menos comuns); zonas subsidentes são identificadas pelos padrões reticulado, multibasinal, centrípeto e palimpsesto; e zonas basculadas são reconhecidas pelos padrões treliça, dicotômico, paralelo, colinear ou palimpsesto (IBGE 1995).

A Tabela 1 apresenta a caracterização de cada um dos principais padrões de drenagem, especificações das condições do terreno e padrões modificados de cada um.

Tabela 1: Mostrando os principais Padrões de Drenagem e suas características e variações.

Básico	Características	Condições Terreno	Modificado	Observações
Dendrítico	<ul style="list-style-type: none"> - Correntes distribuídas em todas as direções; - Confluência em ângulos Agudos 	<ul style="list-style-type: none"> - Rochas homogêneas de caráter sedimentar ou ígneo 	<ul style="list-style-type: none"> - Subdendrítico - Pinado - Anastomótico - Distributário 	<ul style="list-style-type: none"> - Controle estrutural topográfico; - Tributários pouco espaçados e \pm paralelos; - Material textura fina e rede de canais, brejos; - Deltas e cones aluviais.
Paralelo	<ul style="list-style-type: none"> - Canais paralelos; - Vertentes com declives acentuados. 	<ul style="list-style-type: none"> - Falhas paralelas; - Alinhamentos topográficos 	<ul style="list-style-type: none"> - Subparalelo - Colinear 	<ul style="list-style-type: none"> - Regularidade da configuração paralela e terrenos inclinados; - Material poroso (rios intermitentes) e com controle estrutura.
Treliça	<ul style="list-style-type: none"> - Controle estrutural bem marcado; - Confluência em ângulos retos. 	<ul style="list-style-type: none"> - Falhas; - Juntas; - Estruturas homoclinais. 	<ul style="list-style-type: none"> - Direcional - Falha - Fratura - Recurvada 	<ul style="list-style-type: none"> - Canais tributários maiores de um lado do que de outro; - Ângulos retos menos comuns e canais mais espaçados; - Canais retilíneos e paralelos; - Curvas ao redor do nariz de uma dobra.
Retangular	<ul style="list-style-type: none"> - Aspecto ortogonal; - Bruscas alterações retangulares no curso de rios. 	<ul style="list-style-type: none"> - Falhas/Juntas; - Litologia diferente. 	<ul style="list-style-type: none"> - Anguloso 	<ul style="list-style-type: none"> - Ângulos agudos; - Tributários curvados; - Diferentes orientações.
Radial	<ul style="list-style-type: none"> - Correntes dispostas como raio de uma roda. 	<ul style="list-style-type: none"> - Vulcões, domos e estruturas circulares em geral. 	<ul style="list-style-type: none"> - Centrífuga - Centrípeta 	<ul style="list-style-type: none"> - Rios que divergem de um ponto (domos, p. ex.); - Rios convergentes para uma área central (crateras vulcânicas e depressões topográficas).
Anelar	<ul style="list-style-type: none"> - Semelhantes ao desenvolvimento dendros de uma árvore 	<ul style="list-style-type: none"> - Áreas dômicas/bacias profundamente entalhadas. 	-----	-----

4.2 - ANÁLISE DE LINEAMENTOS

Inicialmente, deve-se explicitar a definição de Lineamentos estruturais extraídos de imagens de sensores remotos. O conceito de lineamento proposto por Etchebehere *et al.* (2007), define-os como "feições lineares topográficas ou tonais observáveis nas imagens fotográficas, que podem representar discontinuidades estruturais". O'Leary *et al.* (1976) caracterizam Lineamentos como feições lineares ou curvilíneas mapeáveis em superfície, mas que refletem fenômenos de subsuperfície. Baseados nessa caracterização, Strieder & Amaro (1997) observam que feições de caráter rúptil como falhas e fraturas, apresentam comportamento diferente daquelas desenvolvidas por dobramentos e cavalgamentos, consideram então, que os lineamentos podem ser: tipo I, associados a estruturas penetrativas que desenvolvem feições geomorfológicas positivas e negativas (altos e baixos), paralelizadas em arranjos lineares ou curvilíneas, desenvolvem-se devido ao intemperismo e erosão

diferencial de litologias alternadas, como camadas e derrames vulcânicos, por exemplo, ou de estruturas deformacionais heterogêneas, como foliação, bandamento gnáissico ou lineações; e lineamentos tipo II, associados a estruturas frágeis e geralmente representados por feições geomorfológicas negativas, que são caracterizadas por vales e talwegues. Como as zonas de fraturas são geralmente zonas de infiltração e percolação de água meteórica, torna-se fácil a ação de processos intempéricos e erosivos, controlando o padrão de drenagem e dando lugar a feições retilíneas a levemente curvilíneas.

Através da utilização de ferramentas de Sensoriamento Remoto é possível confeccionar mapas de lineamentos de relevo e drenagem, além de destacar as principais direções e comprimento médio dos lineamentos. A análise visual de Sensores Remotos é de suma importância na identificação de alinhamentos estruturais para posterior caracterização morfotectônica.

Os elementos fundamentais na análise de alinhamento de relevo para interpretação geológica são as rupturas de declive. As pequenas rupturas de declive definem os elementos texturais do relevo, caracterizados pelas menores variações bruscas, identificáveis nas imagens da superfície do terreno. As rupturas de declive constitui estrutura do relevo considerada como quebras negativas ou quebras positivas (Soares & Fiori, 1976). A presença de lineamentos em uma determinada área possui extrema importância na caracterização do relevo da região. Uma dessas estruturas são as falhas que podem predizer a presença de relevo positivo ou negativo. No caso de Carajás, onde se tem uma grande quantidade de serras alinhadas as falhas foram precursoras do soerguimento e inversão desta antiga bacia, expondo-a desta forma a intensos processos erosivos.

CAPITULO II

INFLUÊNCIA ESTRUTURAL SOBRE CAVERNAS EM FORMAÇÕES FERRÍFERAS, CARAJÁS-PA.

Antônio Alessandro de Jesus Braga¹; Alberto Pio Fiori¹; Francisco Ribeiro da Costa²

¹Programa de Pós-Graduação em Geologia, Universidade Federal do Paraná
(bragalessandro@hotmail.com)

¹Programa de Pós-Graduação em Geologia, Universidade Federal do Paraná
(fiori@ufpr.br)

²Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica, Universidade Federal do Pará
(frc@ufpa.br)

Resumo

A pesquisa foi realizada no contexto geológico da Bacia Carajás, Província Mineral de Carajás no sudeste do Pará. Especificamente na mina de ferro N4E, alvo de exploração da Vale. O objeto de estudo são cavernas hospedadas em formações ferríferas bandadas, bem como, em canga que é seu produto de alteração. Tem como principal objetivo avaliar a influência estrutural, processo este, que se mostra eficiente e importante para o desenvolvimento de uma caverna. Foram realizadas análises buscando entender de que forma estruturas descontínuas como, fraturas e bandamentos, controlam essas feições “pseudocársticas”. Muito embora algumas cavernas pareçam não seguir nenhum padrão estrutural, em sua grande maioria encontram-se alongadas segundo planos de fraturas e bandamentos. Elas facilitam a percolação de fluidos que causa dissolução e/ou alteração da sílica, dando origem a pequenas cavernas que seriam as precursoras das cavernas. Os resultados mostraram que as cavernas tendem a se desenvolver segundo planos de fraqueza que facilitam a entrada de água e acarretam no colapso de blocos. No

entanto, os resultados da comparação entre diagramas de rosetas gerados a partir dos canais de drenagem de primeira ordem, e das direções dos principais condutos das cavernas, apontaram para a não correlação com eventos tectônicos recentes, carecendo ainda de mais estudos neste sentido.

Palavras chave: desenvolvimento de cavernas, fraturas, bandamentos.

Abstract

The survey was conducted in the geological context of the Carajás Basin, Carajás Mineral Province in the southeast of Pará. Specifically in the iron mine N4E, exploration target of Vale. The object of study are hosted caves in banded iron formations, as well as in sarong that is your change product. Its main objective is to evaluate the structural influence, a process that is efficient and important for the development of a cave. Analyses were performed in order to understand how discrete structures as fractures and banding, control these features "pseudokarstic". Although some caves do not seem to follow any structural pattern, for the most part are elongated to plans of fractures and banding. They facilitate the percolation of fluids that cause dissolution and / or alteration of silica, resulting in little caves would be the percussoras the caves. The results showed that the caves tend to develop second planes of weakness that facilitate the entry of water and may cause the collapse of the blocks. However, the results of the comparison between diagrams rosettes generated from the first order drainage channels, and the directions of the main conduits of caves, indicated for non correlated with recent tectonic events, yet lacking most studies in this direction

Key words: development of caves, fractures, banding

INTRODUÇÃO

De acordo com a União Internacional de Espeleologia (UIS): “Caverna consiste em uma abertura natural formada em rocha abaixo da superfície do terreno, larga o suficiente para a entrada de uma pessoa”. São feições que ocorrem em larga escala nos calcários e arenitos. Contudo, Formações Ferríferas Bandadas (FFB) e canga (laterita), também comportam inúmeras cavernas. Em Carajás elas ocorrem principalmente na interface entre os dois.

As FFB são compostas por intercalação de bandas de coloração escura representada por óxidos de ferro, hematita e magnetita e por bandas claras de *chert* e avermelhadas de jaspe (Costa, 2006). A canga é um material que ocorre geralmente recobrando o minério de ferro (termo aplicado ao produto de alteração da FFB composto quase que em sua totalidade por hematita). É composta por clastos angulosos principalmente de hematita cimentados por uma matriz de consistência argilosa composta essencialmente por hematita e goetita (Maurity & Kotschoubey, 1995). Sua formação está ligada a processos de laterização com redistribuição de Fe e Al associado a variações climáticas (Dutra, 2013). De acordo com Vasconcelos (1992) o início da laterização na Amazônia se deu em torno de 65 Ma, em seguida a região de Carajás passou por eventos de soerguimento e posterior reativação de processos erosivos (Souza e Kotschoubey, 1991).

Em sua grande maioria, as cavernas ocorrem em cotas altimétricas entre 600 e 700 m, geralmente nas quebras de relevo: borda de lagoas; cabeceiras e borda de drenagens; e nas bordas dos platôs, incluindo-se a alta, média e baixa vertente Piló e Auler (2009). Quanto à gênese, os principais processos identificados por Dutra (2013) são erosão, lixiviação, dissolução e biogênese.

O objetivo principal do trabalho é mostrar de que forma as estruturas descontínuas tais como fraturas, falhas e bandamentos, controlam o desenvolvimento

dessas feições “pseudocársticas”. A hipótese aceita até o momento relata que a influência de estruturas descontínuas sejam elas recente ou não, pode ser esperada por conta da facilidade de percolação de fluidos nessas zonas de fraqueza. Esse processo implica na completa dissolução e/ou alteração de minerais menos resistentes, a se destacar as bandas formadas basicamente por sílica. No entanto, não é possível afirmar que elas se formariam apenas por sofrer tal influência, pois algumas se desenvolvem a partir da porosidade primária ou da acomodação de blocos aglutinados.

Geologia Regional

A Província Mineral de Carajás localizada no sudeste do Pará é uma das mais importantes do mundo principalmente em termos metalogenéticos, pois é dotada de inúmeras mineralizações principalmente de ferro. Possui idade arqueana e está inserida no Cráton Amazônico, sendo constituída pelo Domínio Carajás a norte, que corresponde à Bacia Carajás e Subdomínio de Transição, e pelo Domínio Rio Maria na porção sul (Dall'Agnol *et al.*, 2006; Feio, 2011).

As cavernas a serem analisadas estão situadas principalmente na Formação Carajás, inserida no Grupo Grão Pará. Este grupo faz parte do preenchimento da Bacia Carajás e se constitui pelas formações Parauapebas, Carajás e Igarapé Cigarra (Figura 1).

ÉON	ERA	UNIDADE		DESCRIÇÃO
FANEROZOICO	PALEOZOICO	CORPOS MÁFICOS INTRUSIVOS		Diques e soleiras de diabásio
PROTEROZOICO	INFERIOR	GRANITO SERRA DOS CARAJÁS		Granitos a anfibólios e/ou biotita
		GABRO SANTA INÊS		Gabro grosseiro hidrotermalizado
		FORMAÇÃO IGARAPÉ AZUL		Arenitos com níveis conglomeráticos siltitos intercalado
ARQUEANO	GRUPO GRÃO PARÁ	Formação Igarapé Boa Sorte		Siltitos e folhelhos carbonáticos com arenitos subordinado
		Formação Igarapé Cigarra		Basaltos, tufos, BIF, <i>chert</i> , quartzo- <i>wackes</i> e quartizo arenito
		Formação Carajás		BIF's com soleiras de basalto
		Formação Parauapebas		Basaltos e riolitos
	GRUPO POJUCA	Formação Gameleira		Meta- <i>wackes</i> e meta-siltitos
		Formação Corpo 4		BIF's (sulfeto) e xistos
		Formação Bueno		Anfibolitos BIF's (óxido)
	COMPLEXO XINGU		Gnaisses granodioríticos a tonalíticos, anfibolitos e trondjemito	

Figura 1: Coluna cronoestratigráfica de parte da Serra Norte (Bacia Carajás). Modificado de Macambira *et al.* (1990).

A Formação Parauapebas é representada por rochas vulcânicas máficas e félsicas datadas de 2758 ± 39 Ma por (Gibbs *et al.* 1986). A Formação Carajás está em contato com a Formação Parauapebas e mostra intercalações entre as rochas vulcânicas máficas e a FFB de acordo com Gibbs & Wirth 1990. As FFB são predominantes nessa formação sendo descritas como jaspilito meso e microbandado formado por bandas de jaspe (*chert* impregnado por hematita microcristalina) e óxidos de ferro depositados em 2.751 ± 4 Ma (Krymsky *et al.* 2002). A Formação Igarapé Cigarra, proposta por Macambira *et al.* (1990), possui contato concordante sobre a Formação Carajás, com as camadas de BIF's recobertas por rochas máficas com intercalações de tufos, seguidos por sedimentos

clásticos e químicos (Macambira 2003). É composta por basaltos alterados hidrotermalmente com textura ígnea preservada semelhante aos da Formação Parauapebas, além de serem indistinguíveis química e mineralogicamente. No entanto, os da Formação Parauapebas parecem ser mais magnesianos que os da Formação Igarapé Cigarra.

De acordo com Pinheiro & Holdsworth (2000) Carajás teria sido alvo de cinco episódios tectônicos: transpressão sinistral dúctil, caracterizada pela formação da trama dúctil E-W, entre 3.0 e 2.8 Ga; transpressão sinistral, na qual a trama E-W foi submetida a reativação rúptil; transtensão destal, onde se formaria os sistemas Carajás e Cinzento e também seria responsável pela instalação da Falha Carajás logo após 2.7 Ga; em 2,5 Ga uma transpressão sinistral gera a inversão nas rochas da Bacia Carajás; e no Paleoproterozoico (1,88 Ga), um evento extensivo ou transtensivo possibilitou a intrusão de plútons graníticos e de diques.

Do ponto de vista tectônico recente, as principais estruturas da região de Carajás são representadas por três feixes de falhas transcorrentes E-W e dois feixes de falhas normais N-S (Bemerguy *et al.* 2000). Além de descontinuidades NE e NW interpretadas por Costa *et al.* (1991) como estruturas transpressivas e transtensivas, respectivamente em resposta ao movimento principal de caráter transcorrente destal. Tais estruturas controlam os canais de drenagem mais jovens e perturbam o curso de rios mais antigos condicionando a geração de anomalias de drenagem.

Localização

A área de pesquisa encontra-se localizada na Serra do Carajás mais precisamente Serra Norte, inserida na Bacia Carajás, Província Mineral de Carajás região sudeste do Pará nas adjacências do município de Parauapebas. O acesso pode ser feito através de transporte aéreo até o aeroporto do núcleo urbano de Carajás, por via férrea

ou ainda por via terrestre pavimentada, partindo do município de Marabá no sudeste do Pará, pela BR-155 por 100 km até Eldorado dos Carajás, prosseguindo a partir daí pela PA-275 por 65 km até Parauapebas, em seguida segue pela rodovia Raimundo Mascarenhas em um percurso de 30 km até a entrada das minas (Figura 2).

As cavernas estão associadas a grandes zonas de alinhamentos estruturais, representadas por falhas transcorrentes sinistrais e destrais, as quais correspondem a zonas de cisalhamento. Observa-se que elas se concentram em três áreas distintas: porção norte; porção centro-oeste; e na parte sudeste do mapa. Entretanto, para este trabalho será considerada apenas a área de ocorrência na porção norte (Figura 2).

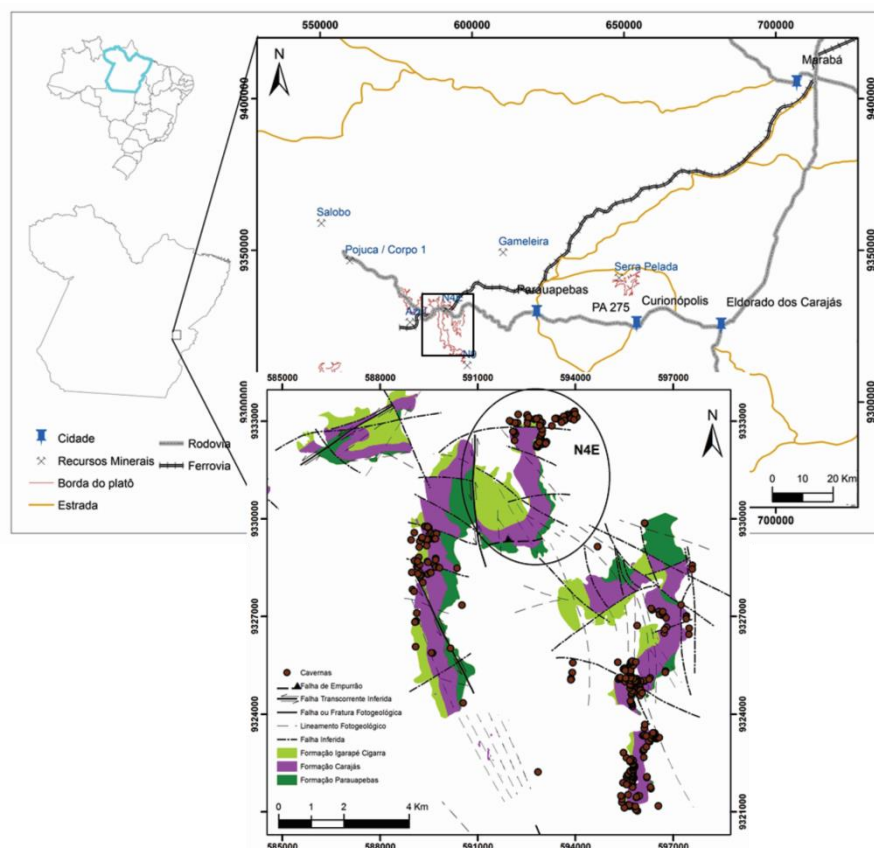


Figura 2: Mapa de localização associado ao mapa geológico de Resende e Barbosa (1972) na escala de 1:25000.

Materiais e métodos

A descrição espacial da área de ocorrência de cavernas, foi realizada a partir da análise de imagens aéreas de radar, Lidar (*Light Detection And Ranging*) para geração dos Modelos Digitais de Terreno (MDT), imagens da missão *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), além de imagens do sensor LANDSAT 8.

A drenagem foi extraída de forma automática no *software Global Mapper* a partir de imagens de radar e corrigida manualmente com auxílio de curvas de nível e da imagem de sensor LANDSAT 8. As principais direções dos canais de drenagem de menor ordem, de acordo com o conceito de hierarquia de Strahler (1952), foram comparadas com as direções dos condutos das cavernas, traçados no *ArcGIS 10.1*.

As campanhas de campo tiveram como objetivo o mapeamento geoestrutural. Os dados coletados foram transformados em mapas geoestruturais e diagramas de roseta.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados apresentados são referentes à análise da rede de drenagem, bem como, seus lineamentos e a caracterização estrutural de cinco cavernas desenvolvidas em FFB e/ou canga.

Análise da Drenagem

A Figura 3 apresenta o mapa de drenagem da área. As principais diferenças estão na angularidade e orientação dos canais.

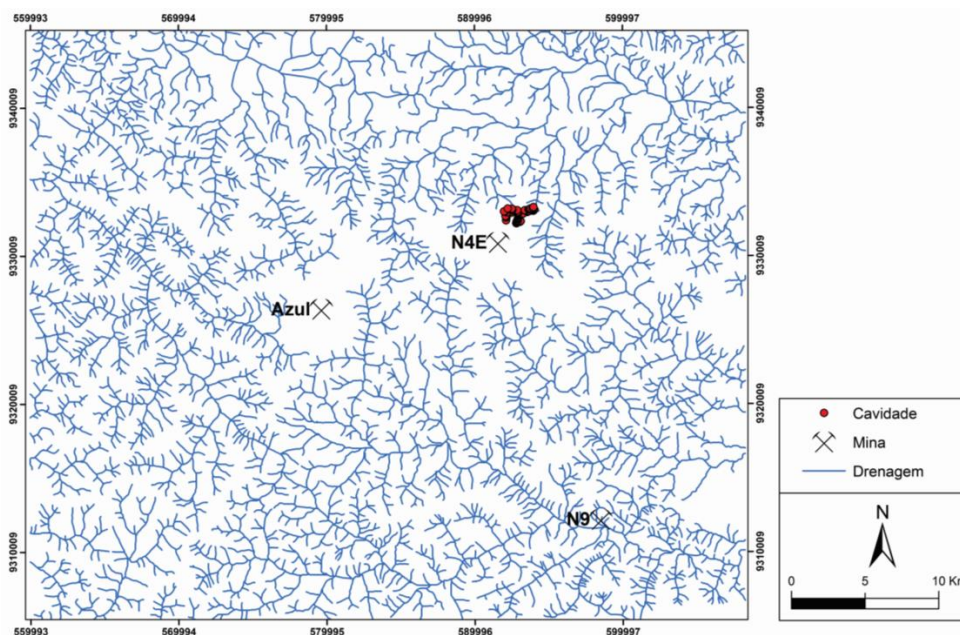


Figura 3: Mapa de drenagem.

Na porção centro sul do mapa, nota-se que os canais não seguem orientação preferencial. Nas porções noroeste e sudeste é possível observar que os canais principais estão orientados segundo a direção NW-SE e os de menor ordem na direção NE-SW. Quanto ao ângulo de confluência, geralmente se interconectam sob alto ângulo, por vezes formando ângulos retos. Existe ainda uma grande diferença em relação à densidade da drenagem. A porção norte, apresenta-se de forma pouco densa diferente do padrão geral do mapa. Isso se deve ao contraste de impermeabilidade e aplainamento da região. Em relação ao padrão de drenagem, no geral, nota-se uma variação de treliça a retangular, o que denota intenso controle estrutural na região.

Lineamentos de drenagem

Os lineamentos indicam forte controle estrutural influenciando a disposição dos canais, pois, ocorrem de forma continua segundo a direção N-S, levemente arqueados para NE. Estão encaixados nos grandes vales N-S que a região de Carajás apresenta, os quais são intensamente entalhados pela rede drenagem, coincidentes com feições

denominadas *splays* de falha, feições estas, intimamente relacionadas à formação da Falha Carajás. Quanto às rosetas, os traços de drenagem ocorrem em direções variadas para comprimento e frequência absoluta (Figura 4)

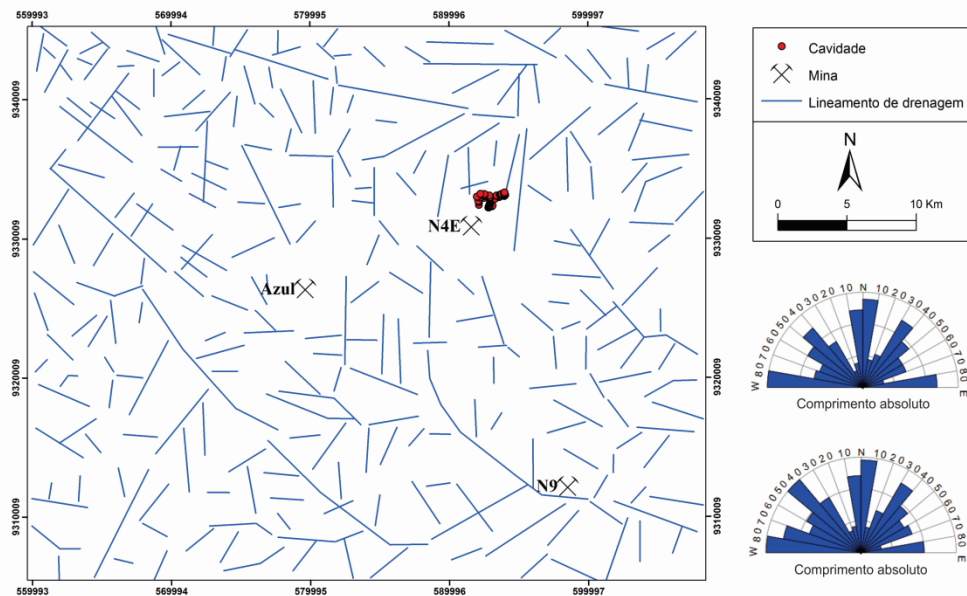


Figura 4: Mapa de lineamentos de drenagem.

O diagrama de rosetas representado pela Figura 5a corresponde às medidas de 271 condutos de 94 cavernas localizadas no corpo de minério N4E. É possível observar que existem condutos nas direções NE-SW, NW-SE, N-S e E-W, sendo este último mais frequente. No diagrama da Figura 5b, estão plotadas 1511 medidas de lineamentos correspondentes aos canais de drenagem de primeira ordem, os quais teoricamente teriam sido gerados por eventos tectônicos mais recentes (Salamuni *et al.* 2004). Como no diagrama anterior, as famílias também ocorrem nas quatro direções. No entanto, as pétalas maiores se dão segundo E-W e N-S. Assim, nota-se uma relativa dispersão nos dois diagramas, onde é possível comparar apenas a família E-W, a qual predomina em ambos.

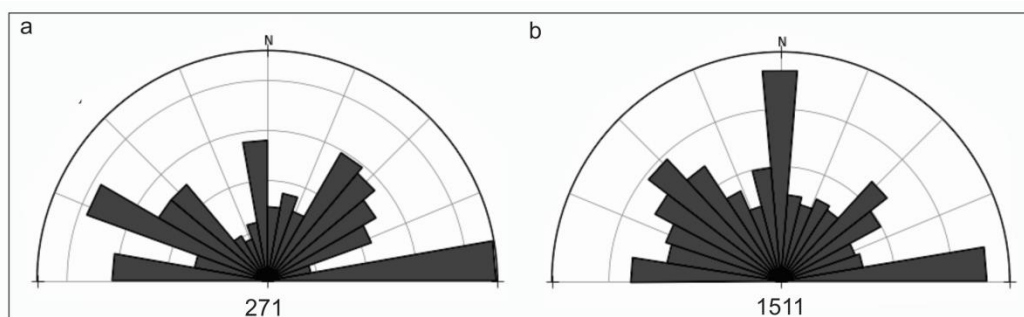


Figura 5: Diagrama de rosetas obtido a partir de 271 direções de condutos de 94 cavernas em **a**. Em **b**, o mesmo diagrama, agora com 1511 direções de canais de primeira ordem da rede de drenagem.

Como relatado por Bemerguy *et al.*(2000) as principais estruturas tectônicas recentes da região de Carajás são feixes de falhas E-W e N-S, o que é comprovado pelo diagrama da Figura 5.

Caracterização geoestrutural das cavernas

As cavernas aqui avaliadas representam uma pequena parte das cavernas de Carajás. Encontram-se hospedadas principalmente em minério de ferro e canga, no entanto, estão presentes também em rochas máficas, muito embora, em menor quantidade. Foi realizada a caracterização geoestrutural das seguintes cavernas: N4E 0014; N4E 0021; N4E 0033; N4E 0092; e N4E 0093 (Figura 6).

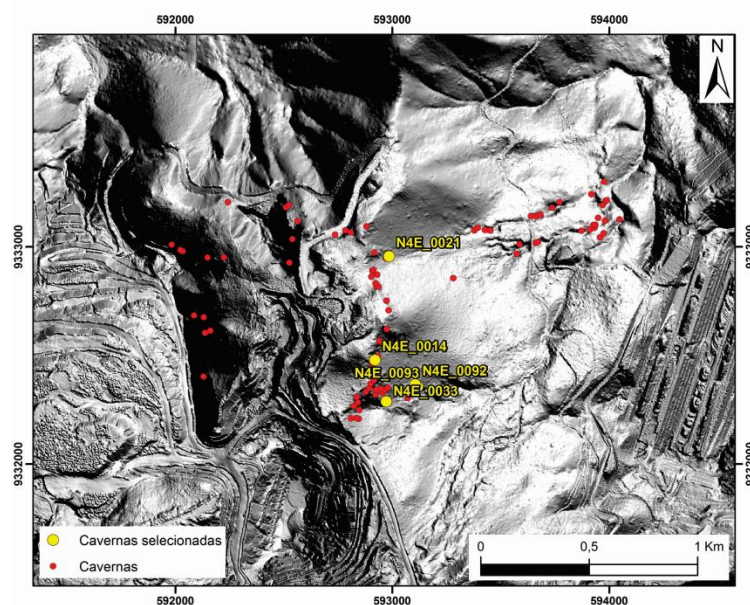


Figura 6: Mapa de localização das cinco cavernas selecionadas.

Caverna N4E_0014

Possui projeção horizontal de 102m. Contém duas entradas, uma a oeste (Figura 7a), a qual tem cerca de 1,3m de altura por 2m de extensão em um afloramento de aproximadamente 8m de altura e a outra mais leste (Figura 7b), desenvolvida em um paredão amplo com cerca de 10m de altura por 18m de extensão. A caverna possui uma forma irregular, entretanto, controlada. O piso apresenta alguns blocos abatidos, sendo inclinado no sentido da vertente e tende a aumentar sua inclinação a partir da entrada em direção ao terço mais distal. As paredes são irregulares, bem como, os pilares.

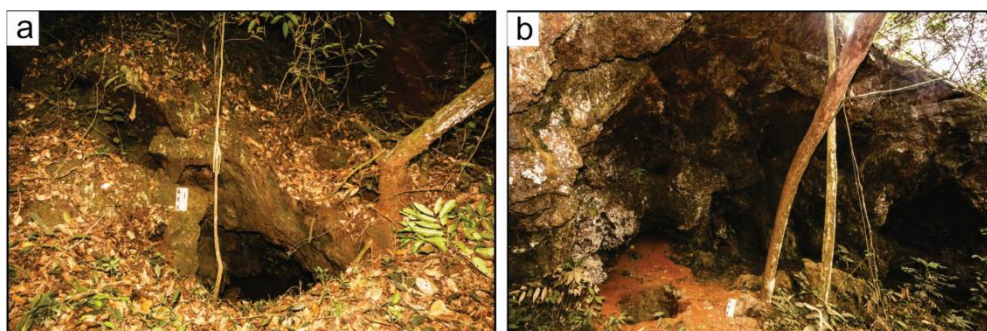


Figura 7: Fotos das duas entradas. a) entrada localizada a oeste. b) entrada situada na porção leste da caverna.

A caverna é hospedada em FFB e canga. A primeira ocorre em cerca de 80% da caverna. As bandas de hematita variam de milimétricas a centimétricas intercaladas com espaços vazios ou impregnados por argila avermelhada (Figura 8a e 8b). Com o avanço em direção ao interior da caverna a FFB tende a se tornar mais avermelhada, por conta da presença mais intensa de argila. A canga que corresponde a 20% possui coloração avermelhada e ocorre principalmente nas porções mais elevadas. Em alguns pontos nota-se a presença de clastos subangulosos de tamanho cm, imersos em uma matriz terrígena avermelhada. Em algumas porções é possível notar uma leve orientação de bandas. Na porção distal as duas litologias não apresentam contatos nítidos, sendo por vezes, difícil definir um limite entre estas. É comum encontrar bolsões de canga dentro da FFB, no entanto, a canga geralmente se dá nas porções mais elevadas.

Apesar de a caverna apresentar forma irregular (Figura 9a), uma análise das direções de fraturas e bandamentos pode indicar controle estrutural marcante. O bandamento ocorre na direção NW-SE com mergulho moderado para NE (Figura 9b). As fraturas mostram duas famílias principais, uma com direção NE-SW subvertical e outra seguindo a direção NW-SE (Figura 9c).

Assim é possível comparar a orientação da direção do bandamento, bem como, da segunda família de fraturas à orientação principal de desenvolvimento da caverna que é NW-SE. A outra família de fraturas se compara a uma direção secundária de desenvolvimento, a qual seria NE-SW. A fratura N40°/60SE possivelmente controlou a interligação entre dois salões outrora separados (Figura 8c). A intersecção de famílias de fraturas com o bandamento gera instabilização do maciço rochoso, o que acarreta em deslocamentos e ampliação da caverna. Na porção distal, fraturas de direção N40° subvertical estão presentes na FFB, bem como, na canga, (Figura 8d). É bastante comum observar dobras na FFB como mostram as Figuras 8e e 8f. Estas são produto de deformação e ocorrem de forma variada, sem seguir um padrão definido.

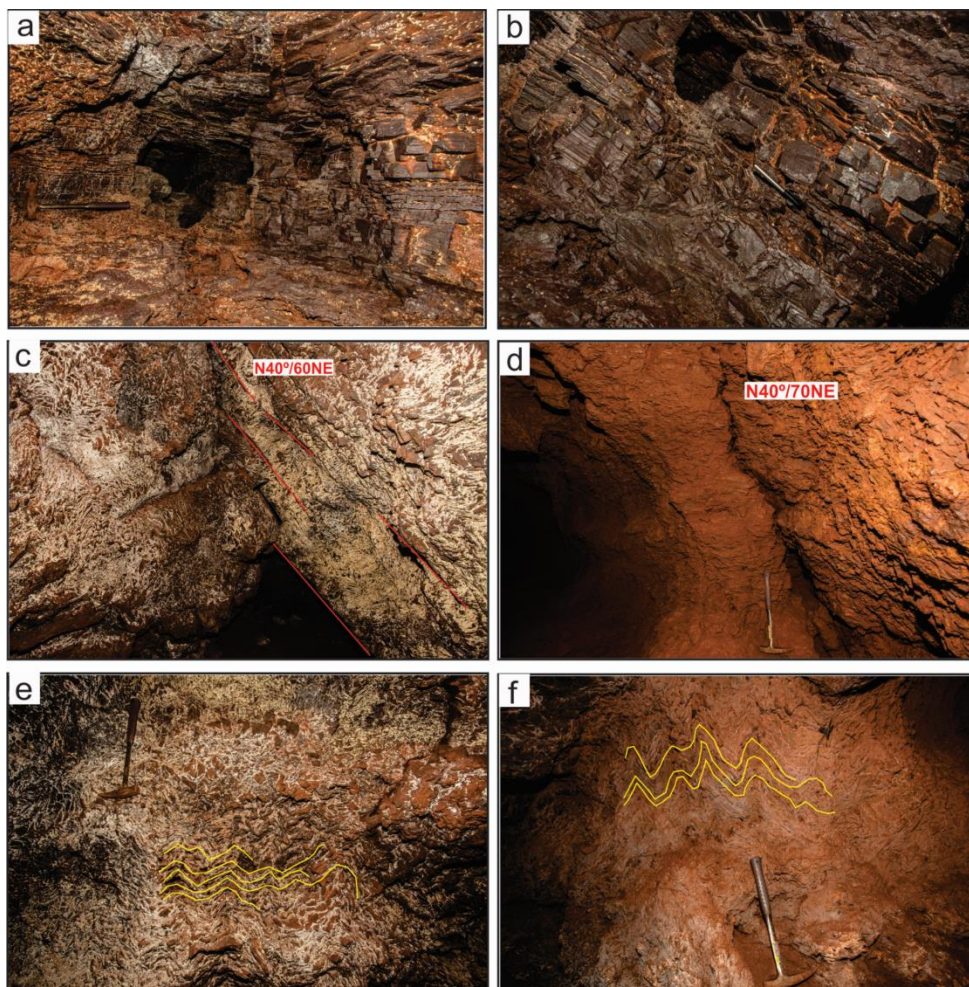


Figura 8: Feições litoestruturais. a) e b) fotos da FFB com bandas de hematita milimétricas a centimétricas, nos espaços entre as bandas nota-se impregnação por material argiloso. c) fratura N40°/60NE marcando a formação de um conduto que interliga duas galerias. d) fratura N40°/70NE na canga. e) dobras na FFB.

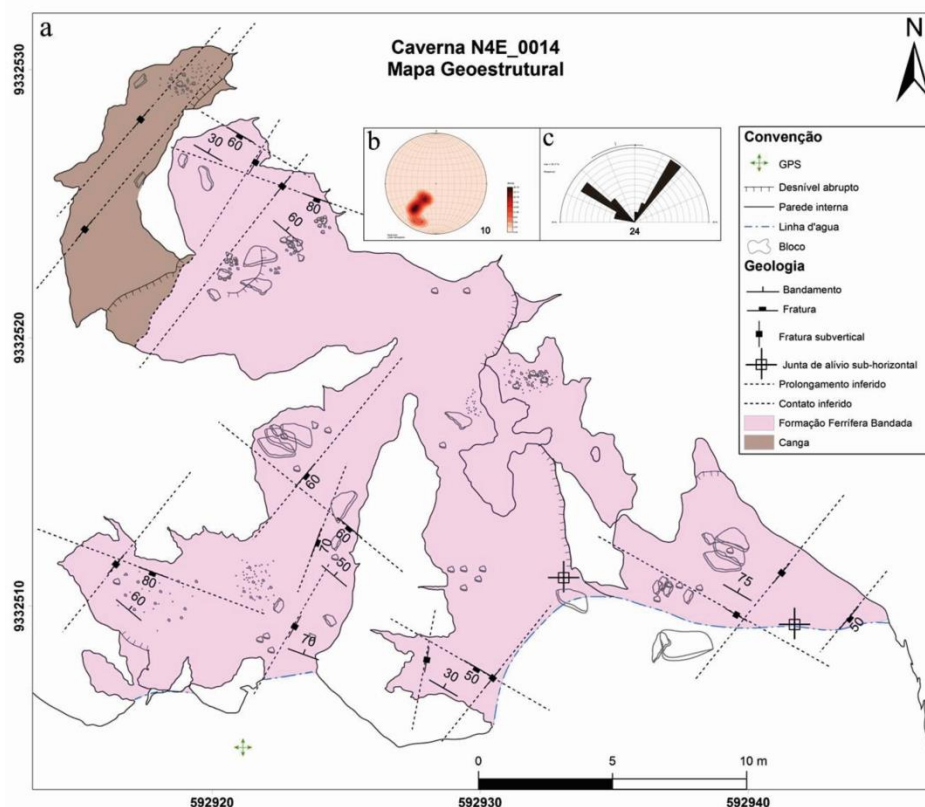


Figura 9: Em a, o mapa geoestrutural da caverna N4E_0014. b) diagrama de polos correspondente a 10 medidas de bandamento. c) diagrama de rosetas com 24 medidas de fraturas.

Caverna N4E_0021

Possui 41m de projeção horizontal com uma única entrada (Figura 10) que segue para um salão de teto baixo, paredes irregulares e piso plano no terço médio, tornando-se inclinado na parte distal, onde o teto se torna mais alto. Matacões abatidos de FFB são observados em toda sua extensão, além de fragmentos hematíticos espalhados por todo o piso.



Figura 10: foto da entrada da caverna N4E_0021.

Litologicamente é composta por Formação Ferrífera Bandada e subordinadamente por canga (Figura 11a e 11b, respectivamente). Na FFB predominam bandas milimétricas a centimétricas de óxido e hidróxido de ferro, por vezes preenchidas por crostas brancas ou argila. Essas bandas frequentemente se apresentam dobradas. Na porção distal encontram-se parcialmente alterada com neoformações goethíticas/hematíticas. A canga ocorre no terço médio, caracterizada por nível mais elevado de deformação e alteração.

A entrada da caverna se formou ao longo do eixo de uma dobra com atitude N 280° (não foi possível medir o caimento). Na parede logo na entrada, encontra-se uma dobra do tipo “*Chevron*” com eixo N 350° e caimento de 45° para NW (Figura 11c). No mapa da Figura 12a, nota-se que os condutos são controlados pela presença de fraturas que formam pares conjugados de direção N60° subvertical e N160°/70NE (Figura 12c) que estão presente seccionando o bandamento (Figura 11d), havendo, por vezes, o encontro dessas fraturas com dobras. O bandamento possui direção NW-SE com mergulho variando para SW e NE (Figura 12b). Algumas fraturas ocorrem cortando as duas litologias a exemplo da caverna anterior. A principal direção de desenvolvimento se da segundo a direção N60°, na qual é possível observar algumas fraturas preenchidas por material silicoso (Figura 11e e 11f).

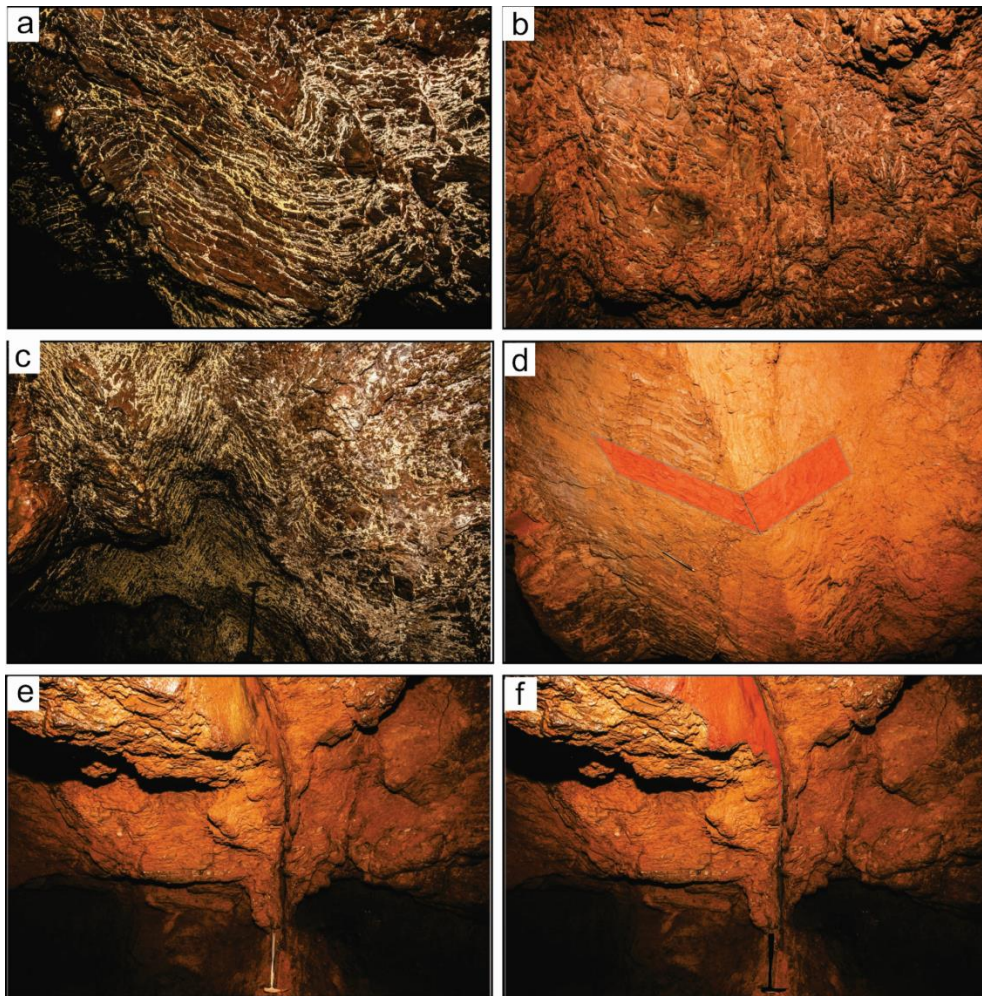


Figura 11: Feições litoestruturais. a) foto da FFB com bandamento levemente arqueado. b) foto da canga com maior nível de deformação e alteração. c) dobras em *Chevron* no mineiro de ferro na entrada. d) planos de fraturas ortogonais seccionando o bandamento. e) e f) plano de fratura subvertical.

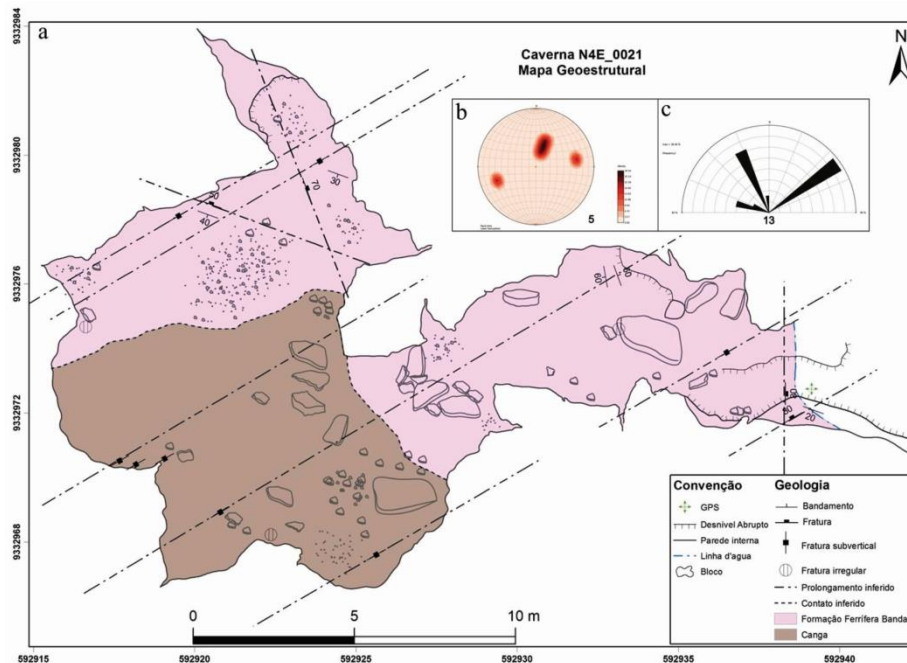


Figura 12: Em **a**, o mapa geoestrutural da caverna N4E_0021. **b**) diagrama de polos correspondente a 5 medidas de bandamento. **c**) diagrama de rosetas com 13 medidas de fraturas.

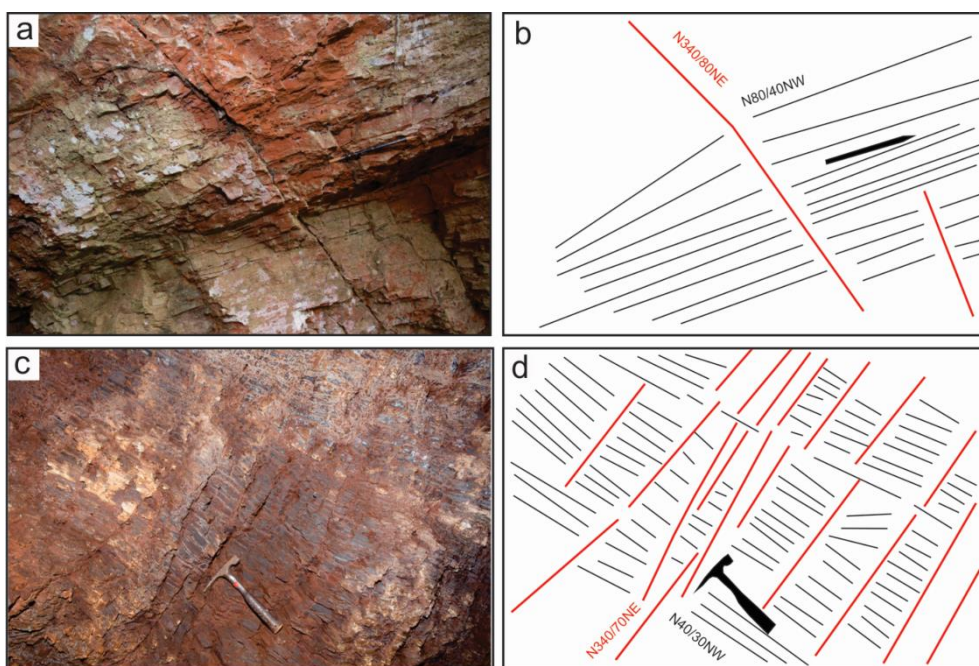
Caverna N4E_0033

Possui 120,4m de projeção horizontal. Contém duas entradas, uma principal e outra suspensa. A entrada principal é pequena (Figura 13a) e progride para um conduto, enquanto a entrada suspensa é mais ampla (Figura 13b) e dá acesso a um salão. O piso nos setores iniciais é plano, tornando-se mais inclinado para o interior. As paredes são irregulares e o teto é baixo na entrada principal, ao passo que se torna mais alto nos terços médio e distal. Matacões abatidos de FFB são observados em toda sua extensão. Nota-se que o material rochoso torna-se mais argiloso nos setores distais.



Figura 13: Fotos da entrada da caverna. a) entrada principal com pequeno desenvolvimento. b) entrada suspensas.

A caverna está hospedada exclusivamente em FFB, com bandamento original preservado, e por vezes moderadamente alterado. As bandas de óxido de ferro são evidentes, bem como, a impregnação por argila em algumas porções. A Figura 14 apresenta as principais feições litoestruturais da caverna.



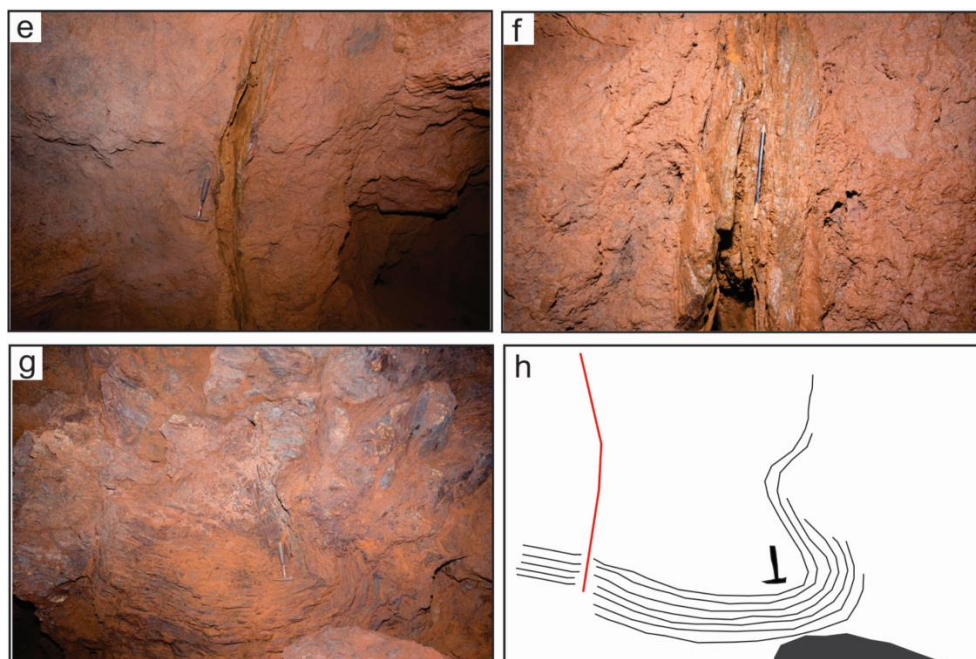


Figura 14: Feições litoestruturais. a) e b) família de fraturas N340°/80NE seccionando o bandamento N80°/40NW. c) e d) família de fraturas N340°/70NE seccionando o bandamento N40°/30NW. e) e f) fraturas N40°/Subvertical preenchidas por material ferruginoso. g) e h) dobra na Formação Ferrífera Bandada.

No mapa geoestrutural (Figura 15a) nota-se que a caverna se desenvolve segundo uma orientação principal NW-SE. O bandamento apresenta direção variando para E-W, NE-SW e NW-SE com mergulhos moderados (Figura 15b). As fraturas possuem direção geral NE-SW e NW-SE com mergulho moderado a alto, como mostra o diagrama de rosetas na Figura 15c, ocorrem sempre cortando o bandamento (Figura 14a, 14b, 14c e 14d). Essa intersecção gera instabilidade no maciço, pois em algumas porções as fraturas fragmentam o bandamento podendo causar deslocamento. Na porção mais distal da caverna, fraturas subverticais abertas N40° são preenchidas por material ferruginoso (Figura 14e e 14f) e possibilitam fluxo de água. Dobras também são evidenciadas principalmente nas paredes (Figura 14g e 14h).

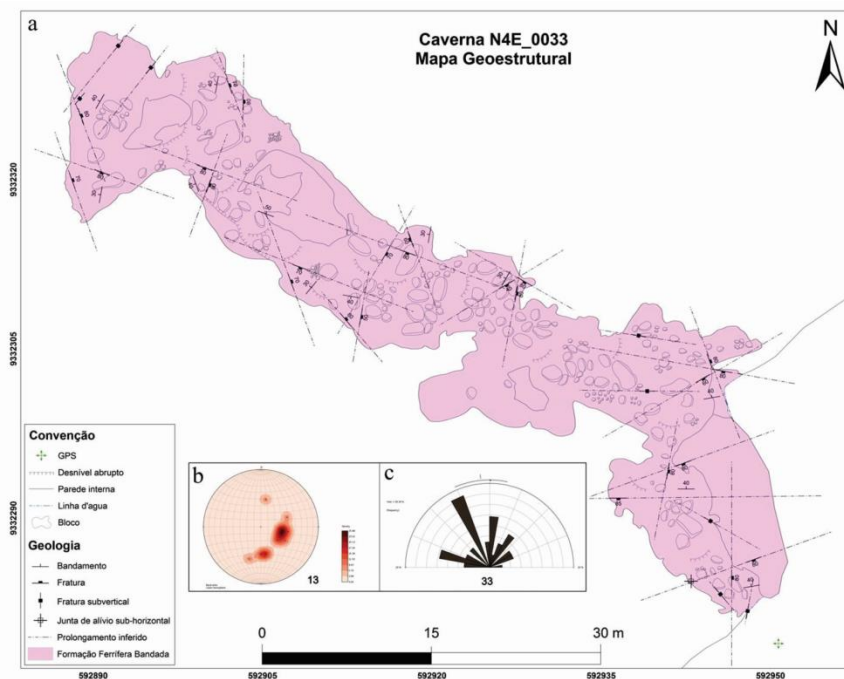


Figura 15: Em **a**, o mapa geoestrutural da caverna N4E_0033. **b**) diagrama de polos de 13 medidas de bandamento. **c**) diagrama de rosetas com 33 medidas de fraturas.

Caverna N4E_0092

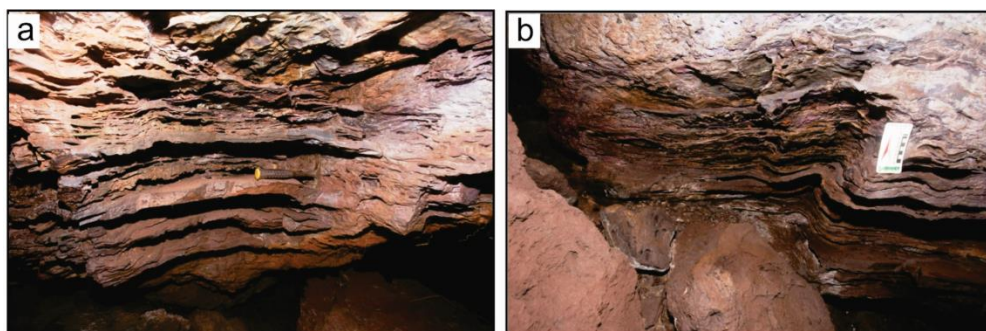
A caverna N4E_0092 se desenvolveu sob escarpamento rochoso irregular, com altura média de 6 m. É constituída por apenas um conduto, amplo, de paredes e teto irregulares. Os sedimentos sobre o piso possuem aspecto “placóide”. Crostas ferruginosas foram observadas nas paredes. A foto da Figura 16 apresenta a única entrada da caverna.



Figura 16: Foto da entrada da caverna N4E_0092.

É hospedada essencialmente em FFB com bandamento preservado caracterizado pela alternância de lâminas de óxido e hidróxido de ferro, de até 1cm de espessura. Entre as bandas observa-se filmes de argila produto da alteração da rocha. Em algumas porções nota-se maior nível de alteração, bem como, pontos onde ocorrem bolsões de canga.

Esta caverna se desenvolveu seguindo orientação aproximadamente N-S, como mostra a Figura 18a. O bandamento apresenta-se com variação de NW para NE, do terço inicial para o terço distal, respectivamente, com mergulhos moderados, o diagrama de polos é apresentado na Figura 18b. Por sua vez, as fraturas se orientam segundo NNW-SSE, bem como, ENE-WSW e WNW-ESE (Figura 18c). O nível de deformação afetou a caverna de forma heterogênia, onde se tem porções com o bandamento preservado (Figura 17a) e por vezes dobrado (Figura 17b), com espaços vazios entre as bandas de ferro, resultado dos processos de remobilização das bandas de sílica, e pontos em que as bandas são cortadas por famílias de fraturas que se intersectam, com espaçamento centimétrico entre estas (Figura 17c). Tais fraturas tendem a cortar o bandamento de forma perpendicular (Figura 17d), em alguns casos pode ocorrer o preenchimento destas por material silicoso. As Figuras 17e e 17f apresentam a FFB dobrada sendo cortada por fraturas de atitude N350°/40SW. Em casos mais extremos podem ocorrer paralelas ao plano de bandamento, o que pode acarretar em deslocamento de blocos (Figura 17g e 17h)



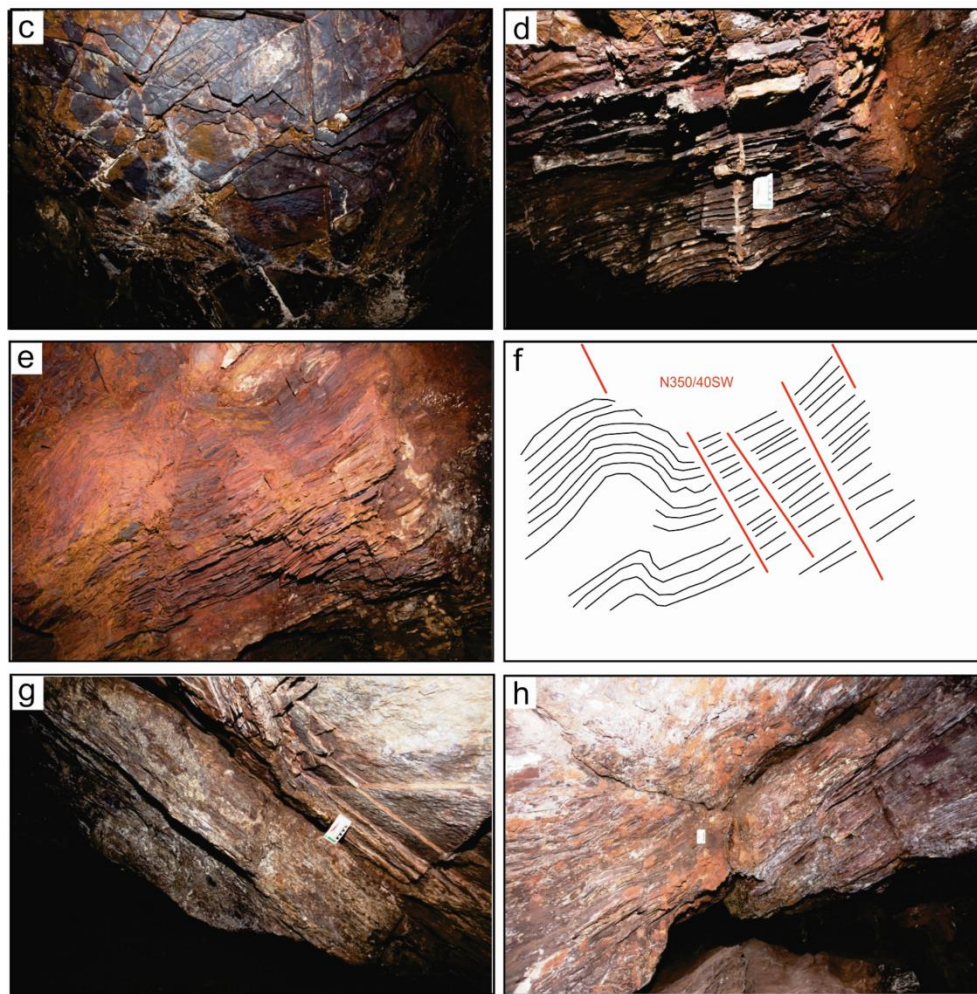


Figura 17: Feições litoestruturais. a) foto da FFB mostrando as bandas de hematita intercaladas com espaços vazios. b) bandamento dobrado. c) famílias de fraturas no perpendiculares ao plano do bandamento. d) fratura subvertical preenchida por sílica seccionando a FFB. e) e f) fratura N350°/40SW cortando a FFB dobrada. g) e h) mostrando o rompimento no paralelo ao plano do bandamento.

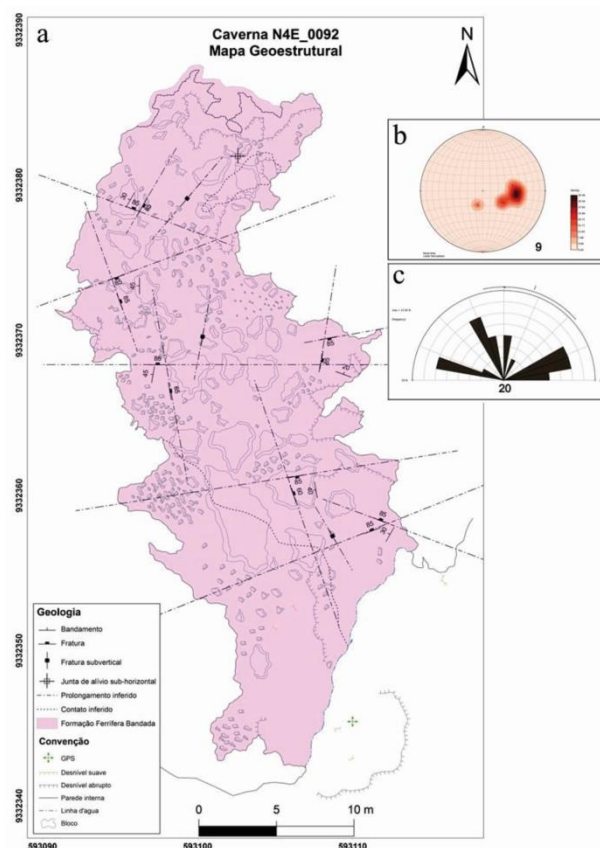


Figura 18: Em **a**, o mapa geoestrutural da caverna N4E_0092. **b)** diagrama de polos correspondente a 9 medidas de bandamento. **c)** diagrama de rosetas com 20 medidas de fraturas.

Caverna N4E_0093

A caverna apresenta 45,5m de projeção horizontal. Possui duas entradas que se conectam através de um conduto. A principal tem cerca de 3m altura por 2,5 de extensão e se desenvolve em um afloramento de aproximadamente 7m de extensão (Figura 19a). Um bloco abatido fecha parte da entrada. A segunda entrada ocorre em uma linha d'agua com cerca de 10m de extensão (Figura 19b). Nas duas, o piso se dá em nível inferior, sendo este, geralmente plano, com algumas partes pouco inclinadas. As paredes são irregulares assim como o teto, que apresenta pontões de FFB.

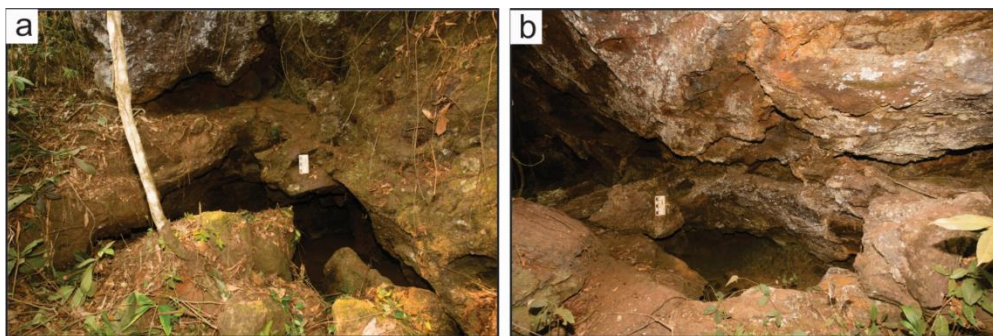


Figura 19: Fotos das entradas da caverna N4E_0093. a) entrada na porção nordeste. b) a sudoeste da caverna.

Desenvolve-se em sua totalidade na FFB. As bandas de hematita variam de milimétricas a centimétricas sendo intercaladas com bandas de minerais menos resistentes, silicosos, que outrora foram removidos e/ou alterados (Figura 20a e 20b). É possível notar em algumas porções a presença de argila avermelhada como produto da alteração do próprio litotipo.

A caverna possui controle estrutural marcante. Sua forma retilínea apresenta desenvolvimento pronunciado na direção NE-SW e secundária para NW-SE (Figura 21a). As principais estruturas descritas foram bandamento e fraturas. O primeiro ocorre em toda a caverna e ainda preserva sua orientação original, desta forma facilita a tomada de atitudes. Todos os pontos medidos apresentaram direção NE-SW com mergulho moderado para NW (Figura 21b). Já o diagrama de rosetas (Figura 21c) evidencia que as fraturas se apresentam aproximadamente paralelas e perpendiculares à direção do bandamento como mostram as Figuras 20c e 20d. A família principal se orienta segundo NE-SW ($45^{\circ}/40\text{NE}$) e uma segunda direção ocorre para NW-SE ($310^{\circ}/\text{Sv}$) de forma subvertical. Por conta da intersecção de fraturas com o bandamento, que pode gerar deslocamento de blocos, é possível denotar gênese endógena, uma vez que, a direção da caverna segue a mesma das estruturas principais.

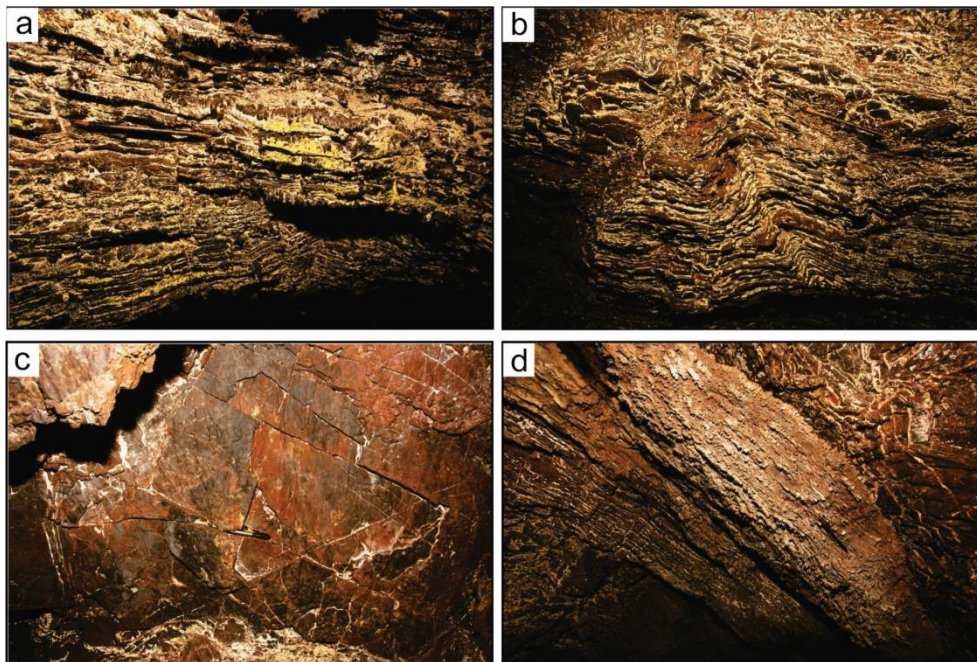


Figura 20: Feições litoestruturais. a) e b) foto do bandamento na FFB. c) e d) fraturas perpendiculares e paralelas ao plano de bandamento, respectivamente.

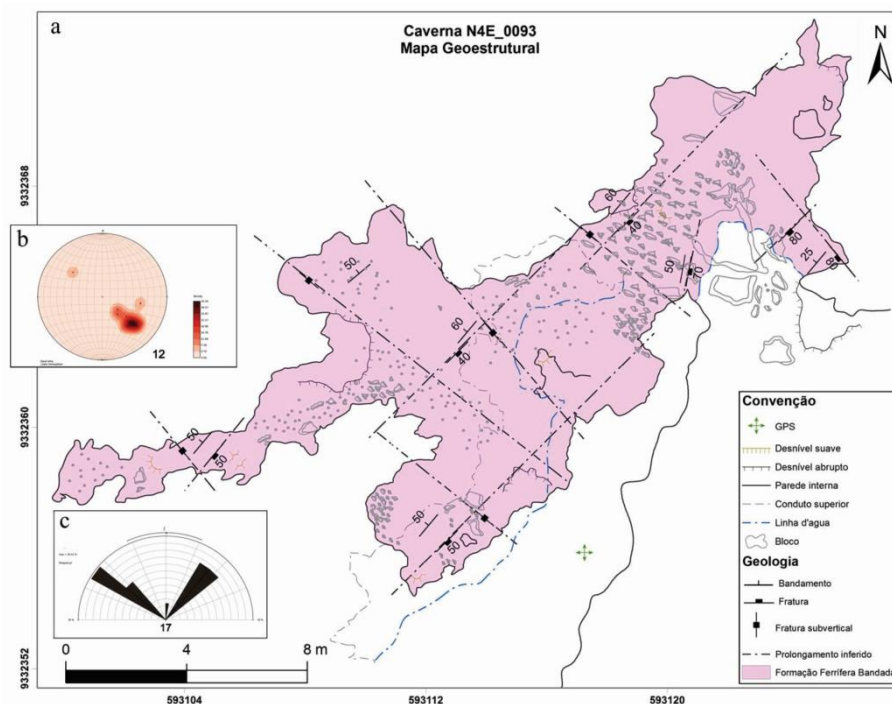


Figura 21: Em a, o mapa geoestrutural da caverna N4E_0093. b) diagrama de polos correspondente a 12 medidas de bandamento. c) diagrama de rosetas com 17 medidas de fraturas.

A influência que estruturas descontínuas desempenham sobre o controle de cavernas já vem sendo relatada em alguns trabalhos. Maurity e Kotschoubey (1995) afirmaram que fraturas atuam como condutos naturais para a água percolar, controlando desta forma, as direções das principais galerias. Por outro lado, Piló e Auler (2009) relatam que as cavernas de Carajás não possuem controle estrutural marcante, o que pode ser atribuído ao fato de várias delas terem sido formadas por acomodação de blocos. Portanto, as cavernas de Carajás podem ser divididas em dois grupos, onde o primeiro corresponde àquelas formadas pela acomodação de blocos e sem controle evidente, e o segundo formado pelas cavernas que apresentam alguma forma de controle, principalmente por estruturas.

As cinco cavernas descritas acima apresentam controle estrutural evidente, seja ele ocasionado pela direção do bandamento na FFB, ou por fraturas que as cortam e possibilitam a percolação de fluidos. A intersecção entre essas estruturas são responsáveis por gerar instabilização no maciço rochoso que acarreta em deslocamento de blocos e consequente ampliação das cavernas. A Figura 22a e 22b apresentam respectivamente, todas as medidas de bandamento coletadas nas 5 cavernas, assim como, as medidas de fraturas. O diagrama de rosetas é diferente do que se esperaria na ocasião das cavernas descritas terem sido influenciadas por eventos tectônicos recentes.

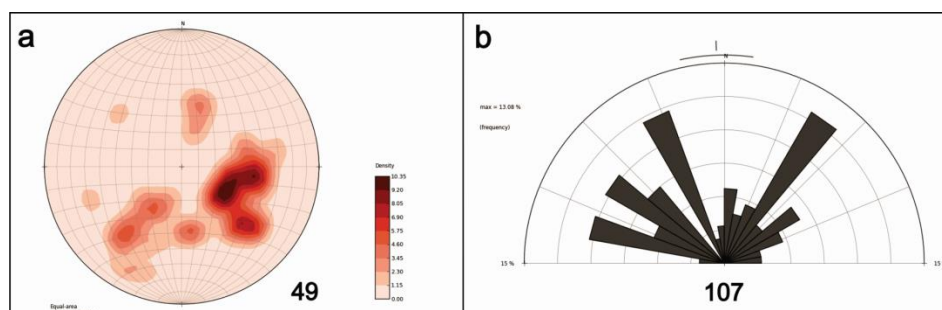


Figura 22: a) diagrama de polos correspondente a 49 medidas de bandamento coletadas nas cinco cavernas. b) diagrama de rosetas com 107 medidas de fraturas para as mesmas cavernas.

A partir dos dados apresentados se torna inconsistente estabelecer relação entre as cavernas estudadas e a influência de eventos tectônicos recentes. Pois a Figura 27b mostra que as principais direções de fraturas ocorrem para NW e NE, ao contrário do que é relatado na literatura, a qual discorre que as estruturas mais recentes da região de Carajás seguem o *trend* N-S e E-W. No entanto, como o universo de cavidades na região é vasto, torna-se imprescindível a realização de estudos neste âmbito a fim de estabelecer tal relação. A princípio pode se afirmar que elas possuem controle estrutural marcante.

CONCLUSÕES

A caracterização das cinco cavernas apresentadas demonstrou que todas apresentam controle por estruturas, sejam elas fraturas ou a direção dos planos de bandamento. Assim, é possível afirmar que elas possuem seu desenvolvimento e ampliação atrelados a alguma descontinuidade que facilite a percolação de fluidos e/ou cause deslocamento de blocos.

Já a comparação entre direção de condutos e a orientação dos canais de drenagem de primeira ordem, os quais podem representar os eventos tectônicos mais recentes da área, atestou que nas cavernas descritas não há influência de estruturas tectônicas recentes. Em contrapartida, cavernas que sejam desenvolvidas em canga podem apresentar tal influência, uma vez que, esse material tem sua gênese ligada ao início do cenozoico.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo de análise geoestrutural em cavernas é bastante complexo e ainda pouco explorado, se comparado à importância econômica que essas feições possuem. Assim, é

recomendada uma análise mais aprofundada a respeito do tema, principalmente no que compete à influência de estruturas neotectônicas.

REFERÊNCIAS

- Bemerguy R.L, Espírito Santo C. V., Costa J. B. S., Rozal E. O. 2000. Aspectos Morfoestruturais e Neotectônicos da Região da Serra dos Carajás (Sudeste do Estado do Pará). UNESP, Geociências, São Paulo, 19(1): 35-49.
- Costa J.B.S., Igreja H.L.S., Borges M.S., Hasui Y.1991. O quadro tectônico regional do Mesozóico na região Norte do Brasil. In: 3º Simpósio de Geologia da Amazônia, Belém. Anais... Belém: SBG, p. 166-178.
- Costa J.B.S., Hasui Y., Bemerguy R.L., Borges M.S., Ferreira Júnior C.R.P., Bezerra P.E.L., Costa M.L., Fernandes J.M.G. 1996. Neotectônica da Região Amazônica: Aspectos tectônicos, geomorfológicos e deposicionais. Geonomos. Revista de Geociências, 4(2): 23-44.
- Costa, U. A. P., 2006. Avaliação dos processos geradores do minério de Ferro da serra norte de carajás, sudeste do Pará. Centro de Geociências da Universidade Federal do Pará Dissertação de mestrado. 110 p.
- Dall'Agnol R., Oliveira M.A., 988 J.A.C., Althoff F.J., Leite A.A.S., Oliveira D.C., Barros C.E.M. 2006. Archean and Paleoproterozoic granitoids of the Carajás metallogenic province, eastern Amazonian craton. Em: Symposium on Magmatism, Crustal Evolution, and Metallogenesis of the Amazonian Craton. Belém, PRONEX-UFPA/SBG, p. 97-150.
- Dutra G.M. 2013. Síntese dos Processos de Gênese de Cavidades em Litologias de Ferro. Anais do 32º Congresso Brasileiro de Espeleologia. Barreiras-BA, p. 415-426.

- Feio G. R. L. 2011. Magmatismo Granitóide Arqueano da Área de Canaã dos Carajás: Implicações para a Evolução Crustal da Província Carajás. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, 190 p.
- Gibbs A.K., Wirth K.R. 1990. Geologic Setting of the Serra dos Carajás Iron deposits, Brazil – Ancient Banded Iron Formations. Theophrastus publications, S.A., Greece, p. 83-102.
- Gibbs A.K., Wirth K.R., Hirata W.K., Olzewski W.J. 1986. Age and composition of the Grão Pará Group volcanics, Serra dos Carajás. Revista Brasileira de Geociências, 16: 201-211.
- Krymsky R.SH., Macambira J.B., Macambira M.J.B. 2002. Geocronologia U-Pb em zircão de rochas vulcânicas da Formação Carajás, Estado do Pará. Em: Anais 2º Simpósio Sobre Vulcanismo e Ambientes Associados. Belém, p. 41.
- Macambira J.B. 2003. O ambiente deposicional do Grupo Grão Pará-Carajás. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 212 p.
- Macambira J.B., Ramos J.F.F., Assis J.F.P., Figueiras A.J.M. 1990. Projeto Serra Norte, Projeto Pojuca: relatório final. Belém, UFPA, DOCEGEO, SEPLAN, DNPM, p. 150.
- Maurity C.W. & Kotschoubey B. 1995. Evolução recente da cobertura de alteração no Platô N1- Serra dos Carajás-PA. Degradação, pseudocarstificação, espeleotemas. Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi, Série Ciências da Terra, 7: 331-362.
- Plló L.B. & Auler, A. 2009. Geoespeleologia das cavidades em rochas ferríferas da região de Carajás, PA. Anais do 30º Congresso Brasileiro de Espeleologia. Montes Claros. SBE, p.181-186.
- Pinheiro R.V & Holdsworth R. 2000. Evolução tectono-estratigráfica dos sistemas transcorrentes Carajás e Cinzento, Cinturão Itacaiúnas, borda leste do cráton Amazônico, Pará. Revista Brasileira de Geociências, 30(4): 597-606.

- Resende N.P. & Barbosa A.L.M. 1972. Relatório de Pesquisa de Minério de Ferro, Distrito Ferrífero da Serra dos Carajás. Pará, 119 p.
- Strahler A.N. 1952. Hypsometric (areal-altitude) analysis of erosional topography. Geol. Soc. Am. Bull., 63: 1117-1142.
- Vasconcelos P.M. & Stone J.O. 1999. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ weathering ages from ancient Australian cratonic surfaces. Regional Conf. On Geomorph., Rio de Janeiro, July 1999, abstracts, p.1.
- Souza C. I. J. Kotschoubey B. 1991. Alguns aspectos micromorfológicos e gênese da cobertura residual sobre rochas sedimentares da aba norte da serra dos carajás, Pará. In: Simp. Geol. Amaz., 3, Belem, **Anais...**, SBG/NN v.1. p.569-583.

CAPITULO III

1 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

O mapa de lineamentos mostra uma relativa variação na densidade de linhas traçadas devido a diferença de elevação ao longo do terreno, uma vez que, essa região possui relevo bastante acidentado com morros tabulares entalhados por vales que tendem a aumentar a taxa de dissecação. É possível identificar grandes lineamentos na direção N-S, pois essa direção corresponde aos *splays* falha Carajás. As rosetas evidenciaram que os traços de drenagem ocorrem em direções variadas para comprimento e frequência absoluta.

As cinco cavernas descritas apresentam controle estrutural evidente, seja ele ocasionado pela direção do bandamento na FFB, ou por fraturas que as cortam e possibilitam a percolação de fluidos. A intersecção entre essas estruturas são responsáveis por gerar instabilização no maciço rochoso que acarreta em deslocamento de blocos e consequente ampliação das cavernas.

A partir dos dados apresentados se torna inconsistente estabelecer relação entre as cavernas estudadas e a influência de eventos tectônicos recentes. Pois as principais direções de fraturas ocorrem para NW e NE, ao contrário do que é relatado na literatura, a qual discorre que as estruturas mais recentes da região de Carajás seguem o *trend* N-S e E-W.

2 – REFERENCIAS

- Ab'Saber A. N. 1973. A organização natural das paisagens inter e subtropicais brasileiras. *Geomorfologia*, São Paulo, 41: 1-39.
- Araújo O.J.B. & Maia R.G.N., 1991. Projeto espacial mapas de Recursos Minerais, de Solos e de Vegetação para a área do Programa Grande Carajás; Subprojeto Recursos Minerais; Folha Serra dos Carajás, Folha SB-22-Z-A, Serra dos Carajás-Pa, DNPM/CPRM. Relatório Final, Rio de Janeiro, p. 136.
- Avelar V.G., Lafon J.M., Correio Jr F.C., Macambira E.M.B. 1999. O Magmatismo arqueano da região de Tucumã-Província Mineral de Carajás: novos resultados geocronológicos. *Revista Brasileira de Geociências*, 29(2): 454-460.
- Barros C.E.M., Nascimento V.M., Medeiros Filho C.A. 2010. Revisão da Estratigrafia das Rochas da Serra Leste, Província Mineral de Carajás. *Revista Brasileira de Geociências*, 40(2): 167-174.
- Bemerguy R.L., Espírito Santo C. V., Costa J. B. S., Rozal E. O. 2000. Aspectos Morfoestruturais e Neotectônicos da Região da Serra dos Carajás (Sudeste do Estado do Pará). *UNESP, Geociências*, São Paulo, 19(1): 35-49.
- Boaventura R. 1974. *Geomorfologia da Folha SB.22 - Araguaia e parte da Folha SC.22 - Tocantins*. Rio de Janeiro, MME, DNPM, (Projeto RADAMBRASIL, 4).
- Christofolletti A. 1980. *Geomorfologia*. São Paulo: Edgard Blücher, 186 p.
- Costa J.B.S., Araujo O.J.B., Santos A., Jorge Joao X.S., Macambira M.J.B., Lafon J.M. 1995. A Província Mineral de Carajás: aspectos tectono-estruturais, estratigráficos e geocronológicos. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi*, 7: 199-235.
- Costa J.B.S., Hasui Y., Bemerguy R.L., Borges M.S., Ferreira Júnior C.R.P., Bezerra P.E.L., Costa M.L., Fernandes J.M.G. 1996. Neotectônica da Região Amazônica: Aspectos tectônicos, geomorfológicos e deposicionais. *Geonomos. Revista de Geociências*, 4(2): 23-44.
- Costa J.B.S., Hasui Y., Borges M.S., Bemerguy R.L., Saadi A., Costa Jr. P.S. 1994. Arcabouço tectônico meso- cenozóico da região da calha do Amazonas. In: 4º Simpósio de Geologia da Amazônia, Belém. *Boletim de Resumos Expandidos*. Belém: SBG, p. 47-50.
- Costa J.B.S., Hasui Y., Borges, M.S., Bemerguy R.L. 1995. Arcabouço tectônico mesozóico-cenozóico da região da calha do Rio Amazonas. São Paulo, Editora da UNESP, *Geociências*, 13(2).
- Costa J.B.S., Igreja H.L.S., Borges M.S., Hasui Y. 1991. O quadro tectônico regional do Mesozóico na região Norte do Brasil. In: 3º Simpósio de Geologia da Amazônia, Belém. *Anais...* Belém: SBG, p. 166-178.
- Costa M.L. 1991. Aspectos geológicos dos lateritos da Amazônia. *Revista Brasileira de Geociências*, 21(12): 146-160.
- Costa, U. A. P., 2006. Avaliação dos processos geradores do minério de Ferro da serra norte de carajás, sudeste do Pará. Centro de Geociências da Universidade Federal do Pará Dissertação de mestrado. 110 p.
- Dall'Agnol R., Oliveira M.A., Almeida J.A.C., Althoff F.J., Leite A.A.S., Oliveira D.C., Barros C.E.M. 2006. Archean and Paleoproterozoic granitoids of the Carajás metallogenic province, eastern Amazonian craton. Em: *Symposium on Magmatism, Crustal Evolution, and Metallogenesis of the Amazonian Craton*. Belém, PRONEX-UFPA/SBG, p. 97-150.
- Deffontaines B. & Chorwicz J. 1991. Principles of drainage basin analysis from multisource data: application to the structural analysis of the Zaire Basin. *Tectonophysics*, Amsterdam, 194: 237-263.

- DOCEGEO. 1988. Revisão litoestratigráfica da Província Mineral de Carajás. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 35, Anais, Belém, SBG: p.10-54.
- Dutra G.M. 2013. Síntese dos Processos de Gênese de Cavidades em Litologias de Ferro. Anais do 32º Congresso Brasileiro de Espeleologia. Barreiras-BA, p. 415-426.
- Etchebehere M. L. C. 2000. Terraços neooquaternários no vale do Rio do Peixe, Planalto Ocidental Paulista: implicações estratigráficas e tectônicas. Tese de doutorado, Instituto de Geociências, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro.
- Etchebehere M. L. C., Saad A. R., Fulfaro V. J. 2007. Análise de bacia aplicada à prospecção de água subterrânea no planalto acidental paulista, SP. Geociências, São Paulo: UNESP, 26(3): 229-247.
- Feio G. R. L. 2011. Magmatismo Granitóide Arqueano da Área de Canaã dos Carajás: Implicações para a Evolução Crustal da Província Carajás. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, 190 p.
- Gibbs A.K., Wirth K.R. 1990. Geologic Setting of the Serra dos Carajás Iron deposits, Brazil – Ancient Banded Iron Formations. Theophrastus publications, S.A., Greece, p. 83-102.
- Gibbs A.K., Wirth K.R., Hirata W.K., Olzewski W.J. 1986. Age and composition of the Grão Pará Group volcanics, Serra dos Carajás. Revista Brasileira de Geociências, 16: 201-211.
- Hirata W.K., Rigon J.C., Kadkaru K., Cordeiro A.A.C., Meireles E.M. 1982. Geologia regional da Província Mineral de Carajás. Em: Anais do 1º Simpósio de Geologia da Amazônia. Belém, 1: 100-110.
- Howard A. D. 1967. Drainage analysis in geologic interpretation: summation. Bulletin American Association of Petroleum Geologist, 51(11): 2246-2259.
- IBGE, Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística 1995. Manual Técnico de Geomorfologia (Coord. Bernardo de Almeida Nunes et al). Série Manuais Técnicos em Geociências. Rio de Janeiro, 5.
- Krymsky R.SH., Macambira J.B., Macambira M.J.B. 2002. Geocronologia U-Pb em zircão de rochas vulcânicas da Formação Carajás, Estado do Pará. Em: Anais 2º Simpósio Sobre Vulcanismo e Ambientes Associados. Belém, p. 41.
- Macambira J.B. 2003. O ambiente deposicional do Grupo Grão Pará-Carajás. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 212 p.
- Macambira J.B., Ramos J.F.F., Assis J.F.P., Figueiras A.J.M. 1990. Projeto Serra Norte, Projeto Pojuca: relatório final. Belém, UFPA, DOCEGEO, SEPLAN, DNPM, p. 150.
- Machado N., Lindenmayer Z., Krogh T.E., Lindenmayer D. 1991. U/Pb geochronology of Archean magmatism and basement reactivation in the Carajás Área, Amazon Shield, Brazil. Precambrian Research, 49: 329-354.
- Maurity C.W. & Kotschoubey B. 1995. Evolução recente da cobertura de alteração no Platô N1- Serra dos Carajás-PA. Degradação, pseudocarstificação, espeleotemas. Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi, Série Ciências da Terra, 7: 331-362.
- Meireles E.M., Teixeira J.T., Medeiros Filho C.A. 1982. Geologia preliminar do depósito de ouro de Serra Pelada. Em: Anais do 1º Simpósio de Geologia da Amazônia. Belém, 2: 74-84.
- Meirelles M.R. 1986. Geoquímica e Petrologia dos jaspilitos e rochas vulcânicas associadas, Grupo Grão Pará, Serra dos Carajás-Pa. Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, 150 p.
- Monteiro M.F. & Silva T.C. (eds.). 1979. Aspectos fluviais importantes para a fotointerpretação. Salvador: Centro Editorial e Didático da Universidade Federal, 44p.

- Nogueira A.C.R. 1995. Análise Faciológica e aspectos estruturais da Formação Águas Claras, Região Central da Serra dos Carajás – Pará. Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 167 p.
- Nogueira A.C.R., Truckenbrodt W., Pinheiro R.V.L. 1995. Formação Águas Claras, Pré-Cambriano da Serra dos Carajás: redescrição e redefinição litoestratigráfica. Boletim Museu Paraense Emílio Goeldi, 7: 177-197.
- O’Leary D.W., Friedman J.D., Pohn H.A. 1976. Lineament, linear and lineation: some proposed new standarts for old terms. Geol. Soc. Am. Bull., 87: 1463-1469.
- Pilló L.B. & Auler, A. 2009. Geoespeleologia das cavidades em rochas ferríferas da região de Carajás, PA. Anais do 30º Congresso Brasileiro de Espeleologia. Montes Claros. SBE, p.181-186.
- Pinheiro R.V & Holdsworth R. 2000. Evolução tectono-estratigráfica dos sistemas transcorrentes Carajás e Cinzento, Cinturão Itacaiúnas, borda leste do cráton Amazônico, Pará. Revista Brasileira de Geociências, 30(4): 597-606.
- Pinheiro R.V.L. & Holdsworth R.E. 1997. Reactivation of Archaean strikeslip fault systems, Amazon region, Brazil. Journal of the Geological Society. London, 154: 99-103.
- Pinheiro R.V.L., 1997. Reactivation history of the Carajás and Cinzento Strike-Slip System, Amazon, Brazil. Tese de Doutorado, University of Durham, Durham, 408 p.
- Resende N.P. & Barbosa A.L.M. 1972. Relatório de Pesquisa de Minério de Ferro, Distrito Ferrífero da Serra dos Carajás. Pará, 119 p.
- Saadi A. 1991. Ensaio sobre a morfotectônica de Minas Gerais. Tese de doutorado, Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, 300 p.
- Salamuni E., Ebert H. D., Hasui Y. 2004. Morfotectônica da Bacia Sedimentar de Curitiba. Revista Brasileira de Geociências, v 34, pg. 469-478.
- Santos M.G.S. 2002. Estudo dos isótopos de Pb e Nd do Depósito de Cu-Au (U-ETR) Alemão, Província Mineral de Carajás (PA). Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 126 p.
- Simmons G.C. 1963. Canga caves in the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. The National Speleological Society Bulletin, 25: 66-72.
- Soares P. C. & Fiori A.P. 1976. Lógica e sistemática na análise e interpretação de fotografias aéreas em geologia. Notícia Geomorfológica, Campinas, v.16, n.32, p.71-104.
- Strahler A.N. 1952. Hypsometric (areal-altitude) analysis of erosional topography. Geol. Soc. Am. Bull., 63: 1117-1142.
- Strieder A.J. & Amaro V.E. 1997. Structural patterns removed from remotely sensed lineaments. Revista da Escola de Engenharia – EGATEA, 25(4): 109-117.
- Teixeira J. B. G. & Eggler D. H. 1994. Petrology, geochemistry, and tectonic setting of Archean basaltic and dioritic rocks from the N4 iron deposit, Serra dos Carajás, Pará, Brazil. Acta Geologica Leopoldensia, 17: 71-114 pp.
- Truckenbrodt W., Kotschoubey B., Schellmann W. 1991. Composition and origin of the clay cover on North Brazilian laterites. Geologische Rundschau, 80: 591-610.
- Vasquez M. L. & Rosa-Costa L. T. 2008. Geologia e Recursos Minerais do Estado do Pará. Programa Geologia do Brasil, Mapas Geológicos Estaduais escalas 1:1.000.000. Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral. Serviço Geológico do Brasil – CPRM. Superintendência Regional de Belém, 328 p.
- Veneziani P., Santos A.R., Paradella W.R. 2004. A evolução tectonoestratigráfica da Província Mineral de Carajás: um modelo com base em dados de sensores remotos orbitais (SAR-C RADARSAT-1, TM Landsat-5), aerogeofísica e dados de campo. Revista Brasileira de Geociências, 34(1): 67-78.

- Vasconcelos P.M. & Stone J.O. 1999. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ weathering ages from ancient Australian cratonic surfaces. Regional Conf. On Geomorph., Rio de Janeiro, July 1999, abstracts, p.1.
- Souza C. I. J. Kotschoubey B. 1991. Alguns aspectos micromorfológicos e gênese da cobertura residual sobre rochas sedimentares da aba norte da serra dos carajás, Pará. In: Simp. Geol. Amaz., 3, Belem, Anais..., SBG/NN v.1. p.569-583.